

Revue des QUESTIONS SCIENTIFIQUES

HELHa
Haute École Louvain en Hainaut

UNIVERSITÉ DE NAMUR

ISSN 0035-2160

Actualité, histoire et philosophie des sciences

Tome 190, N°3-4, 2019

Bureau de dépôt : B 5310 Éghezée - Agréation n°P207124

RÉDACTEUR EN CHEF :

Jean-François Stoffel

Haute école Louvain-en-Hainaut – Domaine de la santé
Rue Trieu Kaisin, 136 – 6061 Montignies-sur-Sambre – Belgique
Courriel : stoffeljf@helha.be

ADMINISTRATION :

Véronique Orose

Université de Namur
Rue de Bruxelles, 61 – 5000 Namur – Belgique
Courriel : veronique.orose@unamur.be

WEBMASTER :

Loris Rossi
Courriel : loris.rossi@outlook.com

Michael Mattiello
Courriel : michael.mattiello@outlook.com

Haute école Louvain-en-Hainaut

SITE INTERNET :

http://www.rqs.be

Fondée en 1877 par la Société scientifique de Bruxelles, *la Revue des questions scientifiques* est une publication périodique trimestrielle toujours publiée par ladite Société, avec le soutien du domaine de la santé de la Haute école Louvain-en-Hainaut et de l'Université de Namur. Pluridisciplinaire et francophone, elle est une revue de haute vulgarisation scientifique, consacrée aux sciences, y compris leur actualité, leur histoire, leur philosophie et leur impact sociétal. Elle est membre de l'Association des revues scientifiques et culturelles de Belgique. Tous les manuscrits reçus sont soumis à un comité de lecture constitué d'au minimum deux experts. En fin d'année, leur nom est publié dans la Revue.

La Revue est dépouillée par le CISMeF, l'*Index Religiosus*, le *Répertoire bibliographique de la philosophie / International Philosophical Bibliography*.

Revue des Questions Scientifiques, 2019, 190 (3-4) : 257-259

Table des matières

Articles

Actualité

Analyses critiques

Comptes rendus

La Rédaction de la *Revue des Questions Scientifiques* remercie les experts sollicités tout au long de cette année 2019, à savoir :

Carlyne Arnould (*Haute école Louvain-en-Hainaut*) — Costantino Balestra (*Haute école Bruxelles-Brabant*) — Nicolas Boulanger (*Université de Mons*) — Virgil Bru (*British School of Osteopathy*) — Fabien Buisseret (*Haute école Louvain-en-Hainaut*) — Christine De Mol (*Université Libre de Bruxelles*) — Nathalie Fasbender (*Haute école Louvain-en-Hainaut*) — Massimo Ferrari (*Università degli Studi di Torino*) — Bertrand Hespel (*Université de Namur*) — Roberto Maiocchi (*Università Cattolica del Sacro Cuore, Milan*) — Astrid Modera (*Université de Namur*) — Bertrand Prévost (*Université Bordeaux-Montaigne*) — Stéphanie Rolin (*Haute école Louvain-en-Hainaut*) — Philippe Ruelle (*Université catholique de Louvain*) — Jean-François Stoffel (*Haute école Louvain-en-Hainaut*) — Emmanuel Tourpe (*Arte*)

Dans nos prochains numéros

Analyses critiques

Jean-Michel Maldamé
Scientifiques en désir de métaphysique

Giorgio Matteoli
Alexandre Koyré, cinquante ans plus tard :
Considérations sur l'état des études koyréennes

Patricia Radelet-de Grave
L'idée de « Mathesis universalis »
chez Leibniz

Ces textes sont déjà disponibles pour nos abonnés sur la première page de notre site, rubrique « les publications à venir »

www.rqs.be

Revue des Questions Scientifiques, 2019, 190 (3-4) : 261-348

Retrouver la première analyse de la cycloïde

À partir des échanges de correspondance entre Roberval et Torricelli, et en vue d'une histoire des fonctions d'une variable

Jean Dhombres
Centre Koyré
École des Hautes Études en Sciences Sociales
Centre National de la Recherche Scientifique
jean.dhombres@cnrs.fr

Résumé. – Cet article s'inscrit dans le cadre d'une étude du concept de fonction mathématique. Pour l'histoire comme pour l'enseignement, il ne peut pas se réduire à la simplicité acquise à la fin du XIX[e] siècle en théorie des ensembles grâce à Georg Cantor. La réflexion sur un avant peut donner un allant structurel à ce que l'on a appelé la quantification du monde à partir de la Renaissance, qui à quelques égards, pourrait ressembler au numérique actuel des *Big Data*. Paradoxalement peut-être, au lieu d'une couverture philosophique, il est ici procédé à la manière du travail d'archéologue, en décapant les différentes strates de la résolution des problèmes sur la seule courbe cycloïde (ou roulette). Grâce à une nouvelle évaluation des échanges de lettres entre Roberval et Torricelli, deux savants mathématiciens et physiciens qui ne se sont jamais rencontrés. Qu'on dise en effet, à l'instar de l'abbé Gallois qui servit de secrétaire de l'Académie des sciences vers la fin du XVII[e] siècle, que cette roulette a fait « tant de bruit dans la République des Lettres » ne suffit pas à expliquer en quoi la courbe a servi en géométrie différentielle bien sûr comme en mécanique, mais tout autant pour les différentes présentations et représentations du Calcul, le calcul différentiel et intégral. Strictement parlant, cette courbe particulière ne devrait pas déterminer les problèmes que les mathématiciens ont alors posés et résolus. Pourtant on la retrouve toujours depuis 1637, et quoiqu'aujourd'hui un peu oubliée, elle a suscité plusieurs postérités. Il ne s'agit pas d'une nouvelle histoire de ces avatars ; un seul filon est exploité : la représentation paramétrique de cette courbe. C'est un lieu fonctionnel, et le but du présent article est de l'expliquer.

La représentation de la cycloïde est publiquement exprimée en quelques lignes sans formules en 1637 par Mersenne, et une certaine habitude pousse à la négliger, tant du point de vue de la logique alors qu'était ainsi résolu un aspect du paradoxe de la roue d'Aristote, que du point de vue de la mécanique alors que se définissait le roulement sans glissement. Ainsi la postérité de la roulette que je veux suivre combine de façon indissociable les notions de variable et de fonction, puisque telle est la nature de la paramétrisation de fournir des coordonnées comme variables, mais aussi comme fonctions. Je vais manifester ce qu'a permis la spatialisation du numérique par le graphe d'une « fonction numérique d'une variable réelle ». Et si on se limitait à un seul résultat, l'intérêt inattendu du long terme de la roulette serait d'avoir permis la fonction sinus dont la première représentation graphique périodique est fournie assez tard en 1670 par Wallis dans un texte sur la cycloïde précisément, et d'avoir ainsi lancé l'étude des ondes appelées à une extension considérable jusqu'à nos jours. La focalisation fonctionnelle met du coup en une nouvelle perspective les questions sur les indivisibles, les sommes de lignes, et les infinitésimales. Car le regard, depuis la collecte de ces deux concepts liés de fonction et de variable, devenus des objets d'une assez grande banalité, peut aussi mieux cerner la mise en place de l'Analyse, à partir des rapports entre calculs dits analytiques et représentations géométriques auxquelles une qualité intuitive est souvent attribuée, porteuse aussi d'un handicap formel. La surprise vient en fin de cette étude d'y trouver la règle dite de la chaîne pour les fonctions composées.

Abstract. – This paper is part of a study of the concept of mathematical function. For history and for teaching alike, it cannot be reduced to the set theory simplification advanced by Georg Cantor at the end of the 19th century. Forward thinking can provide a structural drive to what has been called the quantification of the world from the Renaissance onwards, which in some ways might resemble the current digital Big Data. Herein, and perhaps paradoxically, instead of receiving a philosophical dressing, it is dealt with in the manner of archaeological work, by stripping away the various strata of problem-solving on a single cycloid curve (or roulette). This thanks to a new assessment of the exchange of letters between Roberval and Torricelli, two renowned mathematicians and physicists who never met. It is certainly not sufficient to say, following on from Jean Gallois who served as secretary of the Academy of Sciences towards the end of the 17th century, that this roulette created "such a sensation in the Republic of Letters" in order to explain the way in which the curve was used in differential geometry, as it was in mechanics, and equally so in the various presentations and representations of Calculus, differential and integral calculus. Strictly speaking, this particular curve should not determine the problems that mathematicians then posed and resolved. Yet it has been around since 1637, and although today a little forgotten, it has generated several successors. New avenues have not been explored, they all follow in the same vein: the parametric representation of this curve. It is a functional place, and the purpose of this article is to explain it. The representation of the cycloid is publicly expressed in a few lines without formulae in 1637 by Mersenne, but it was disregarded by force of habit, both from the point of view of logic, even though an aspect of Aristotle's wheel paradox was thus resolved, and from the point of view of mechanics, even though it defined slip-free rolling. Thus, within the posterity of the roulette that I wish to expound upon, the notions of variable and function are inextricably linked, since such is the nature of the parameterisation, providing coordinates as variables as well as functions. I will exhibit consequences of the digital spatialisation by means of the graph of a "numerical function of a real variable". And if we were to limit ourselves to a single result, the long-

term, unexpected benefit of the roulette would be to have made way for the sinus function, of which the first periodical graphic representation is provided towards the end of 1670 by Wallis in a text featuring the cycloid, and thus to have sparked the study of waves that is still ongoing today. Consequently, functional focus offers a new perspective on the issues surrounding indivisibles, line sums, and infinitesimals. Since the observation of these two related concepts of function and variable, having become rather commonplace, one also has a better understanding of the implementation of analysis, from the relationship between so-called analytical calculations and geometric representations to which an intuitive quality is often attributed, also possessing a certain limitation. The big surprise at the end of this study is to finally uncover the so-called chain rule for composite functions.

Mots-clés. – Analyse (comme méthode) — Cycloïde — Fabri, Honoré — Fonction (graphe d'une) — Leibniz, Gottfried Wilhelm — Mersenne (Académie mathématique de) — Riemann (sommes de) — Roberval (méthodes de) — Roulette — Tacquet, André — Torricelli (indivisibles de) — Wallis, John.

Plan de l'article

1. Introduction

L'historiographie particulièrement riche sur la courbe cycloïde[1], signalée par tous pour avoir été ignorée des Anciens[2] et donc présentée comme un étendard des Modernes, s'établit sur le long terme en deux comptes-rendus bien distincts. D'une part s'offre une voie géométrique envisagée comme ayant servi la cause intégrale. Elle part d'un problème trop vite qualifié de fondateur, le calcul de l'aire d'une arche par le biais des « indivisibles » ou d'un « flux » de droites, avec comme initiateurs assurés Roberval, supposément à partir de 1634 et Torricelli assurément dix ans plus tard en 1644 avec un appendice à ses *Opera geometrica*[3] ; elle débouche sur le Calcul (un abrégé commode pour calcul différentiel et intégral) après des péripéties et des querelles retentissantes qui mirent en jeu Blaise Pascal et John Wallis un peu avant 1660, et une rectification non moins étonnante par Christopher Wren. C'est sur la cycloïde que le Calcul est expliqué par Leibniz à Huygens en 1690, quand bien même la lettre n'aura été publique que bien plus tard, et d'ailleurs elle ne fait que reprendre ce qu'on pouvait lire dès 1686 aux *Acta Eruditorum*[4]. Leibniz y exprime une « équation différentielle », qui peut donner tout à la fois la valeur de l'aire

1. D'emblée le nom de la courbe pose problème : Mersenne lui donne le nom de roulette dans l'*Harmonie universelle* en 1637, Torricelli le nom de cycloïde en 1644, et Roberval aurait plus tôt suggéré celui de trochoïde. Parce qu'il est devenu commun, j'adopte le nom de cycloïde sans avoir à trancher sur quelque priorité que ce soit.
2. La plupart des histoires des mathématiques, et à peu près toutes les histoires des sciences un peu précises, évoquent la cycloïde. Elle a été largement traitée par Étienne Montucla dans son *Histoire des mathématiques* (1758, Partie IV, livre I, p. 42 *et seq.*) et avec la collaboration d'autres auteurs, dont Lalande, dans la seconde édition fortement augmentée et révisée (1799, Partie IV, livre I, p. 52 *et seq.*). On peut consulter Moritz Cantor (1880-1908), ou Gino Loria (1950) et Morris Kline (1972). Des documents autour de Pascal constituent un dossier sérieux sur la cycloïde dans *Œuvres complètes de Pascal* (1992). Il existe une monographie de Clero et Le Rest (1980). J'ai moi-même réalisé une histoire de la cycloïde à partir de l'historiographie ancienne dans : *A new narrative centered on Torricelli and Roberval with the cycloid as a pretext to understand the diverse ways of the mathematical revolution*, à paraître chez Springer Verlag dans un volume sous la direction de R. Pisano consacré à l'*Opera geometrica* de Torricelli.
3. Torricelli, 1644a ; la partie sur la cycloïde est pp. 85-92.
4. Lettre de Leibniz à Huygens du 25 juillet 1690 (Huygens, 1888-1950, vol. 9, p. 451 *et seq.*). Cette lettre fut d'abord publiée par P. J. Uylenbroek en 1833. L'équation cartésienne de la cycloïde était déjà donnée par Leibniz en 1686 dans un second article aux *Acta Eruditorum,* en juin 1686, lorsqu'il introduisait le signe intégral : *De geometria recondita et analysi indivisibilium atque infinitorum*. La lettre de 1690 s'adressait à un professionnel de la cycloïde, et donc ne misait que sur ce qui pouvait surprendre ce dernier dans l'effet produit par le Calcul.

et la tangente en un point courant ; il fait apparaître une question autre que celle de l'aire et se rejoindre le moyen différentiel et le moyen intégral par l'outil de l'équation différentielle qui allait permettre l'effectivité d'une nouvelle physique mathématique. Elle signale aussi, même si le nom ne figure pas, ce sur quoi porte l'équation d'un type nouveau : c'est une fonction d'une variable, déguisée sous le nom de courbe solution, et elle se montre comme l'objet du Calcul. Mon emploi au mode réflexif d'un verbe entend souligner le fait qu'il n'y a pas eu une pensée *a priori* sur les fonctions : elles se sont peu à peu imposées sans avoir eu besoin d'une définition univoque qui ne vint d'ailleurs que beaucoup plus tard par Georg Cantor, et minimise d'ailleurs l'autre ingrédient essentiel qu'est la variable réelle.

La seconde voie dans l'historiographie de la cycloïde est celle de la mécanique, à partir d'une conception du roulement sans glissement d'un cercle sur un axe rectiligne, que l'on reconnaît due à Marin Mersenne. Elle fut publiée au deuxième volume de l'*Harmonie universelle*[5] officiellement sorti en 1637, quoique le supplément ou 20e livre où il se trouve ait pu sortir au début de l'année suivante[6]. La voie mécanique, qui pourvoit directement la tangente au point courant selon l'invention de Descartes, s'est elle-même divisée en deux genres disciplinaires. Avec d'une part une suite de type purement géométrique où s'illustre un Philippe de la Hire à la fin du XVIIe siècle, et débouche au XIXe siècle sur la notion de mouvement plan sur plan qui gère la cinématique géométrique[7]. Et d'autre part la constitution de la mécanique infinitésimale à partir de l'idée d'un centre instantané de rotation, éventuellement repoussé à l'infini pour tenir compte d'une translation pure et qui est associée à la mécanique du solide indéformable, laquelle ne prit corps qu'avec le second Euler, celui de bien après la *Mecanica* de 1736. Je devrais sans doute envisager la recherche sur les centres de gravité, et celle liée aux volumes engendrés par la cycloïde, sur lesquels joue Fermat, mais l'historiographie les range naturellement en géométrie, leur faisant quitter l'aspect mécanique.

5. Le texte des « Observations physiques et mathématiques » qui vient à la fin de ce volume, et est paginé séparément, sera référé selon Mersenne, 1637b.
6. Ce détail n'est pas anodin, car au cours de l'année 1638 il y eut une série de lettres portant sur la cycloïde, de Fermat et de Descartes, et elles ne se réduisent pas au seul aspect du calcul d'une aire, ou de volumes par révolution, voire de centres de gravité. Voir en bibliographie la section 18.3 des références à des correspondances et 18.4 à des références primaires.
7. Le théorème fondamental de cette discipline est que tout mouvement plan sur plan correspond au roulement sans glissement d'une courbe sur une autre (Mannheim, 1894).

Au final de ces deux voies, et de cette dernière bifurcation, on trouvera la cycloïde représentée en deux disciplines différentes, la géométrie différentielle et la mécanique, et donc généralement traitée en deux phases distinctes par les historiens spécialisés. Elle ne fait plus partie des *must* d'une initiation au Calcul ou plus généralement à l'Analyse, et est au mieux un détail anecdotique.

Il existe pourtant une troisième voie, qui est nettement moins parcourue dans l'historiographie, et c'est justement celle de l'analyse à laquelle je ne mets pas de majuscule. Car c'est en tant qu'elle n'a pas d'abord besoin d'un support géométrique pour se dérouler, qu'elle fait jouer des équations, mais aussi qu'elle inaugure un nouveau genre de figuration, celui du graphe fonctionnel à deux dimensions pour lequel intervient une variable réelle en abscisse. Elle provient, paradoxalement à première vue, d'une conception de la courbe par les seules équations paramétriques, et sépare ainsi ordonnée et abscisse en les rendant indépendantes, deux fonctions disons-nous justement et non une seule. C'est cette voie que je veux explorer, et à laquelle je ne donne pas pour le moment d'autres caractéristiques épistémologiques, puisque je parle à la fois de figurations et d'équations, d'algèbre et de géométrie.

Cette voie permet d'envisager comme postérité les « fluxions » à la façon de Newton, réunit le calcul intégral et le calcul des tangentes, quasiment sans avoir besoin de la représentation figurée puisque l'on peut avoir la fluxion en abscisse et celle en ordonnée. Newton, et de façon plus générale les Anglais, ne posent pas les questions, certes également analytiques, de la voie géométrique dite souvent leibnizienne des quadratures, et en particulier la reconnaissance des secteurs de cycloïde qui seraient « rationnels », c'est-à-dire dont l'expression de l'aire ne dépend pas du nombre pi (π) : les frères Bernoulli s'en occupèrent beaucoup au tournant du siècle[8]. L'historien Étienne Montucla, dès 1758 dans la première édition de son *Histoire des mathématiques*, avait établi

8. Une fois le calcul différentiel établi, Johann Bernoulli se posa dans les *Acta Eruditorum* de 1699 la question de savoir quelles sont les cordes dans une arche de cycloïde qui déterminent un secteur dont l'aire « ne dépende pas de la quadrature du cercle », c'est-à-dire dont l'aire ne dépende que du rayon du cercle et des cosinus ou sinus des angles du paramétrage de la cycloïde correspondant aux extrémités de la dite corde (voir Johann Bernoulli, *Ad novas spatiorum Cylcloïdalium…*, *Opera*, vol. 1, 1742, p. 330 *et seq*). C'était en quelque sorte une question inverse de celle que Mersenne espérait un moment résoudre : la quadrature du cercle entendue à l'ancienne à partir de celle de la cycloïde. Johann et Jacob Bernoulli rivalisèrent aussi dans l'obtention d'une bande horizontale dans l'arche dont l'aire ne dépend pas de π. Johann Bernoulli inclut à ce sujet des titres de son frère dans ses *Opera* ; Jacob Bernoulli, *Quadratura zonarum cycloïdalium promota*, *Opera*, tome 2, p. 871 *et seq*, et p. 892 *et seq*. Les calculs sont résumés dans Francisco Gomes Texeira, *Traité des courbes spéciales remarquables planes et gauches*, tome 2, chapitre 10,

le lien entre ce qu'avait fait plus tôt Roberval et la méthode des fluxions de Newton mise au point avant 1671. Cependant la généalogie jusqu'à Newton que suggère Montucla est différente de celle que je propose ; elle va faire largement fi des indivisibles et des infiniment petits. Je cite Montucla alors qu'il vient d'expliquer la théorie des mouvements composés, distincte *a priori* de l'étude historique de la cycloïde, et utilise le mot « géométrique » dans son sens de respect de la rigueur euclidienne, mais sans allusion nécessaire à des figures.

> « Ce qu'on vient de dire montre suffisamment l'analogie de cette méthode avec celle des fluxions : *Roberval* la conçut même, & l'appliqua aux courbes d'une maniere très-géométrique, & où il n'entroit aucune supposition d'infiniment petits. On peut s'en assurer par l'inspection des divers exemples de son Traité. Mais nous ne croyons pas que cela doive porter la moindre atteinte à la gloire de *Newton*. En effet il s'en faut bien que *Roberval* ait sçu donner à sa méthode l'étendue dont elle étoit susceptible. C'étoit en quelque sorte avoir peu fait, que d'avoir démêlé ce principe : il falloit trouver un moyen commode de déterminer à chaque point d'une courbe le rapport des vîtesses dont est composée la direction moyenne du mobile qui la décrit. Aussi *Roberval* ne déterminoit-il les tangentes, que dans certains cas particuliers où ce rapport est facile à démêler. Il lui falloit même choisir dans les courbes les plus connues celles de leurs propriétés qui le laissent appercevoir le plus facilement : dans les sections coniques, par exemple, ce n'étoit pas par la relation de l'ordonnée à l'abscisse qu'il déterminoit la tangente ; il se servoit pour cela de celle des lignes tirées des foyers à la courbe, comme on l'a vu plus haut. Ainsi lorsqu'on ne connoissoit point dans une courbe de propriété qui donnât presque immédiatement ce rapport, sa regle se trouvoit en défaut entre ses mains, & il ne pouvoit assigner la tangente. » (Montucla, 1758, vol. 2, p. 40 [Part IV, livre I]).

Juger ainsi, c'est parier sur l'absence d'un signe avant-coureur de type fonctionnel chez Roberval. Mon propos, je dois le préciser à nouveau, n'est ni d'approfondir la liaison qui irait de Roberval au Newton des fluxions, ni de critiquer cette filiation ; il consiste à chercher chez Roberval lui-même et dans l'entourage de Mersenne autour des années 1640, et surtout dans les échanges avec Torricelli, ce qui peut expliquer que l'indéniable découverte des équations paramétriques de la cycloïde n'ait pas donné lieu à une exploitation purement analytique et que les deux seules voies, géométrique et mécanique, mention-

les courbes cycloïdes, pp. 136-139. Ces calculs sont impensables sans la disponibilité du Calcul, mais le Calcul n'y conduit pas nécessairement comme on le voit avec Newton.

nées au début, aient prévalu dans la mémoire mathématique. Sans que le graphe d'une fonction, par exemple celui de la fonction sinus, ne soit envisagé comme une invention à la fois de calcul et de figuration, méritant une explication autre que de circonstance. L'importance de la fonction sinus envisagée par Roberval est dûment signalée par Bourbaki dans son *Histoire des mathématiques*, ce qui est très rarement fait, mais y est pourtant ignoré le graphe qui est une sorte de joker dans cette partie à plusieurs joueurs sur les fonctions (Bourbaki, 1974, p. 243).

Toujours à partir de Roberval et des équations paramétriques, on pourrait imaginer une autre généalogie qui conduit à Leibniz par la transmutation des courbes en ce qu'elle construit une courbe à partir d'une autre par un procédé de type fonctionnel. Il en sera discuté plus loin dans le présent article, mais ce n'est pas notre propos majeur.

Constatons en passant que la double notion de fonction et de variable permet à tout le moins un équilibre étonnant entre les deux créateurs du Calcul, sans qu'il soit besoin d'en appeler à un quelconque copiage. Et sans que soient soulevées les questions de convergence, d'infiniment petits ou de limites, qui constituent les caractéristiques de l'Analyse telle qu'on la conçoit aujourd'hui et que j'écris avec une majuscule. L'analyse que je considère ici est plus ancienne, plus vague aussi dans ses contours, et consiste à diviser un problème, supposé résolu, en parties.

L'archéologie d'un pensée qui n'aurait pas explicitement débouché dans son propre cadre, puisque l'on ignore le jeu fonctionnel quoiqu'il soit devenu moyen banal en mathématiques, peut se prévaloir d'une nouvelle étude des manuscrits[9] de Roberval à la suite d'un répertoire (non publié) par Alan Gabbey, de la mise à disposition depuis 1988 de la totalité de la *Correspondance de Mersenne*, bizarrement non mise en ligne alors que l'on dispose au Centre Koyré d'un exemplaire utilement corrigé de cette *Correspondance*[10], et de travaux plus récents sur les indivisibles sous la direction de Vincent Jullien, comme d'ailleurs sur les débats contradictoires à propos de « l'aventure de

9. Est lancée une traduction en français de toutes les lettres et écrits en latin de Roberval à partir d'un premier colloque au Centre Koyré le 31 janvier 2018, intitulé : *Roberval au miroir des autres savants*. Est déjà à paraître une recension de Jean Dhombres, *Textes sur la roulette au XVIIe siècle*, qui a été mise sur Hal.

10. Il est facile dans cette *Correspondance* de repérer par l'index toutes les interventions de la cycloïde, et un recensement partiel a été publié au volume VI, appendice IV, p. 584 *et seq*. (Correspondance Mersenne, 1932-1988).

l'infinitésimal »[11]. Elle bénéficie des éditions des textes aussi bien de Newton que maintenant de Leibniz. Mais je ne cherche pas à réaliser une histoire exhaustive de la cycloïde.

La quête d'un autre lieu conceptuel chez Roberval est certes une remise en cause de l'importance donnée aux indivisibles dans la genèse d'une pensée sur les courbes, et donc dans l'analyse historique de ce qui a conduit à l'étude de l'immersion de l'axe réel dans l'espace à deux dimensions. Ne faut-il pas revenir à des choses assez simples à propos des courbes ? En posant la question des concurrences et des diffusions, en évitant la focalisation sur des priorités et sur l'insuffisance conceptuelle des indivisibles, je trouve utile la remarque que fait Boyer dans un article se voulant élémentaire en vue de mathématiciens débutants, justement ceux apprenant l'Analyse mathématique :

> « En d'autres termes, la méthode des indivisibles n'a pas été la propriété de Cavalieri. Elle fut largement utilisée par des hommes au courant des pensées mathématiques de l'époque.
>
> Cavalieri et ses contemporains aussi bien considéraient que la méthode des indivisibles faisait partie de la géométrie. Mais, alors même qu'il composait son œuvre, une révolution analytique balayait toute l'Europe. » (Boyer, 1970).

Je veux interpréter cette « révolution analytique » si bien nommée au-delà du sens qui vient trop naturellement à l'esprit en rapport à la « géométrie analytique » dont le nom ne fut pourtant trouvé qu'à la fin du XVIIIe siècle (Boyer, 1956) et qui donne aujourd'hui l'impression de se limiter aux courbes « géométriques » dirait Descartes, c'est-à-dire algébriques. Or justement la cycloïde est une courbe « transcendante », expression trouvée par Leibniz, ou courbe « mécanique » selon Descartes qui ne les traite pas moins avec succès, quoique les excluant de la *Géométrie* de 1637. Comme la dernière expression fait se joindre la première à la deuxième voie ci-dessus discutée, je me propose d'explorer l'intervention des équations paramétriques comme indiquant le lancement de la troisième voie, qui ne se serait pas perdue avec le temps, mais seulement dissoute dans une sorte d'évidence. L'histoire de la banalisation est toujours difficile (Dhombres, 2000) ! En traçant cette voie, je n'oublie pas que

11. Voir pour les indivisibles, Jullien (2015a) et pour les prétendues « infinitésimales », Alexander (2014). Ainsi que diverses contributions ultérieures qui font référence à cette « aventure », sans doute mal nommée comme « infinitésimale », mais très bien dite comme une aventure. On trouvera évidemment en bibliographie les références à l'œuvre revisitée de Leibniz. Pour celle de Newton, la référence est à Whiteside, et pour une lecture particulière à Panza.

les équations paramétriques sont un des moyens d'aller vers la conception des variétés différentiables, donc de donner une conception moderne de la géométrie. Mais celle-ci n'est qu'une partie de ce que Boyer qualifiait de « révolution analytique », et qu'il ne pouvait qu'inscrire dans le cadre de la « révolution scientifique », dont la signification a été amplifiée par Alexandre Koyré, et qui quoiqu'on pense de son importance, voire de son existence effective, demeure pour l'historiographie une des conceptions de les plus fortes lorsqu'il s'agit de comprendre le rôle des mathématiques dans l'investissement de la pensée humaine vers l'action sur le monde à partir de certaines représentations. L'espace, parce qu'encadré par les coordonnées et les calculs, n'aurait-il pas pu révolutionner l'appréhension des mathématiques en tant qu'elle est aussi une physique ? Les courbes, et les fonctions qu'elles comportent, sont à prendre comme des étapes essentielles pour l'étude de la pression atmosphérique ou pour celle de la vitesse dans la chute des corps, deux exemples marquants tant de cette révolution scientifique que de la quantification du monde. Et qui peut penser que ces deux « événements » puissent être totalement dissociés, l'un traité par les historiens et l'autre par les historiens des sciences ?

Nous voilà conduits à l'archéologie du point de vue épistémologique de la banalité fonctionnelle. Comment procéder pour ne pas être débordé par le nombre de textes, et leurs fréquentes insuffisances à nos yeux ? Comment éviter une sorte de téléologie de la banalité dans les classes du Secondaire. Pour examiner si cela a bien lancé une tradition, le mieux est de partir de la première trace attestée de la courbe cycloïde, et on la trouve chez Mersenne.

2. Les enregistrements de la roulette par Mersenne dans l'Harmonie universelle

XI. Observation

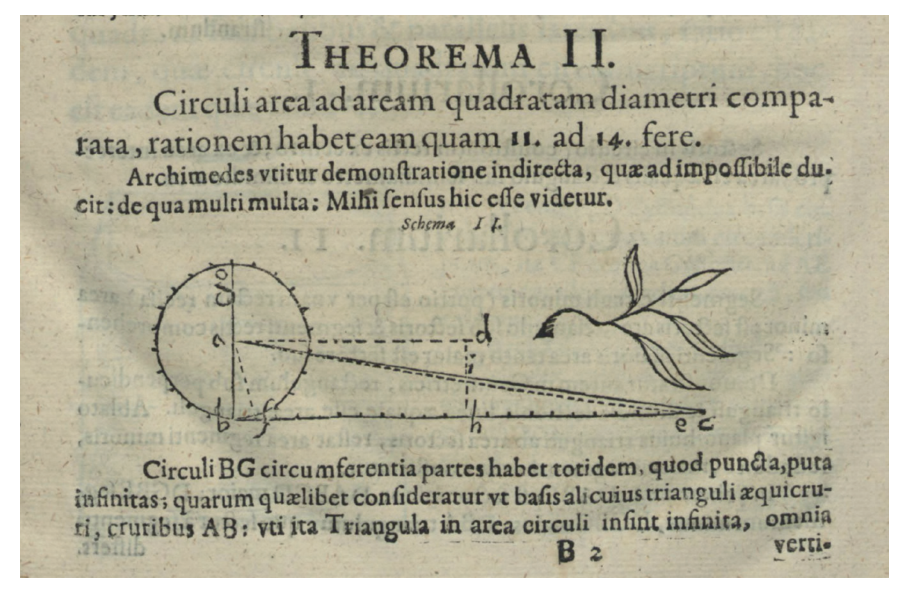
De la ligne décrite par la revolution d'un cercle sur un plan droit.

« Dans la 9 Prop. du 2 livre des Mouvemens, j'auois dit que le cercle ou le globe roulant sur un plan horizontal, & faisant son tour entier, décrivoit la moitié d'une Ellipse, parce qu'en effet la ligne estant décrite mechaniquement, comme j'ay dit, approche si pres de la moitié d'une Ellipse, qu'il est malaisé d'en appercevoir la difference à l'œil. Mais lors qu'on examine cette ligne geometriquement, elle n'est ny Ellipse, ny Helice, ny Quadratrice, car elle est entredeux, & se peut décrire en plusieurs façons, premierement comme j'ay dit dans ladite 9 Proposition : en second lieu, par les sinus verses & droits du cercle

qui décrit la ligne ; car si on éleve les sinus verses sur la ligne décrite sur le plan horizontal par la circonference du cercle, à laquelle elle est égale, & que l'on applique tellement aux sommets des sinus verses les sinus droits, qu'ils soient tirez à costé gauche, & paralleles au plan, la ligne courbe décrite par le cercle, passera par toutes les extremitez des sinus droits, comme par autant de points, qui monstrent la maniere de la décrire. La 3 maniere de la décrire a esté trouvée par un excellent Geometre, par le moyen d'un cercle divisé en tant de parties que l'on voudra, par l'entremise de plusieurs diametres, dont l'un estant vis à vis de la ligne du plan, les autres se trouvent tellement disposez à l'égard de ladite ligne droite du plan, qu'autant de lignes droites, comme il y a de semidiametres décrits dans le cercle, estans tellement appliquées dessus ou dessous la ligne du plan, qu'elles soient paralleles, & égales ausdits semidiametres, les extremitez de ces lignes marquent les endroits, ou les points, par lesquels cette ligne courbe, laquelle on peut nommer *roulette*, doit passer. »

Aucune des trois manières de décrire et construire la courbe qu'explique Mersenne dans la 11e Observation reprise ci-dessus ne fait jouer la question de l'aire de l'arche de cycloïde. Si l'on devait qualifier ces manières, la première serait dite graphique ou expérimentale par enregistrement, la troisième approchée pour certains points convenables repérés sur une division du cercle en arcs égaux à partir de tables numériques. Seule la seconde ne dispose pas pour cette époque d'une qualification ou d'une disqualification (voir la reprise du texte un peu plus bas). Elle ne pourrait pas être dite mécanique au sens où Descartes emploie ce mot puisqu'il n'y a aucun mouvement en jeu. Elle ne pourrait être dite « inexacte » ou « approchée » qu'au sens où la représentation d'un angle ou d'un sinus le serait : car il est évident que l'on dispose avec cette construction, en utilisant les tables numériques alors publiées, d'une bien plus grande précision que ne pourrait avoir n'importe quelle construction graphique, même à la règle et au compas si elle était possible. Comme il est tout à fait notable que Mersenne évite de donner une figure, c'est donc la qualification d'analytique qui conviendrait, en acceptant dès lors de faire intervenir la trigonométrie, donc de ne pas prendre le mot analytique au seul titre de l'algèbre. On n'est assurément plus dans le cadre de la géométrie des « Éléments d'Euclide », et au moins dans un prolongement du cadre adopté par Archimède dans « De la dimension du cercle », quand intervient un triangle rectangle dont l'un des côtés est le périmètre du cercle. Je prends comme arrière-plan général une figure utilisée en 1615 par Kepler, lorsqu'il présente sa version du résultat d'Archimède, où l'on reconnaît la division du cercle en parties angulaires égales dont les longueurs des arcs circulaires correspondants sont reportées sur

la ligne droite, avec le triangle infinitésimal *abf*.[12] Cette image, que je nomme illustration 1, a pu jouer un grand rôle dans l'imaginaire savant au XVIIe siècle en ce qu'il est deviné que ces petits triangles en pointillés doivent s'additionner. Elle pose plus de problèmes de calcul qu'elle n'en résout sur ce que l'on somme et ce qui est seulement approché. Appliquer du courbe sur du droit contraint à préciser la variable utilisée, celle de l'angle pour dire à la fois le découpage du cercle et celui du triangle rectangle (illus. n°1) : la figure donne l'impression qu'il s'agit des mêmes angles et rend donc interrogatif. La question va trouver une forme de solution avec la notion de roulement sans glissement. Ce n'est pourtant pas là que réside l'analyse, mais dans l'exploitation de la notion. À nous de correctement le donner à voir.



THEOREMA II.

Circuli area ad aream quadratam diametri comparata, rationem habet eam quam 11. ad 14. fere.

Archimedes vtitur demonſtratione indirecta, quæ ad impoſſibile ducit: de qua multi multa: Mihi ſenſus hic eſſe videtur.

Schema I I.

Circuli BG circumferentia partes habet totidem, quod puncta, puta infinitas; quarum quælibet conſideratur vt baſis alicuius trianguli æquicruri, cruribus AB: vti ita Triangula in area circuli inſint infinita, omnia

B 2 verti-

Illus. n°1.

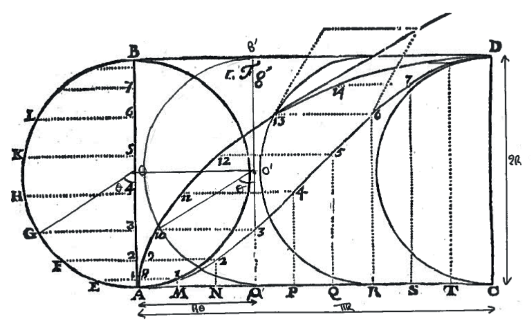
Deuxième figure de Kepler en 1615 dans *Nova Stereometria dolorium vinariorum,* où l'on trouve des pointillés et des petits traits orthogonaux pour indiquer la considération d'un « petit » triangle dans le cercle et ses appuis répétés sur une droite.

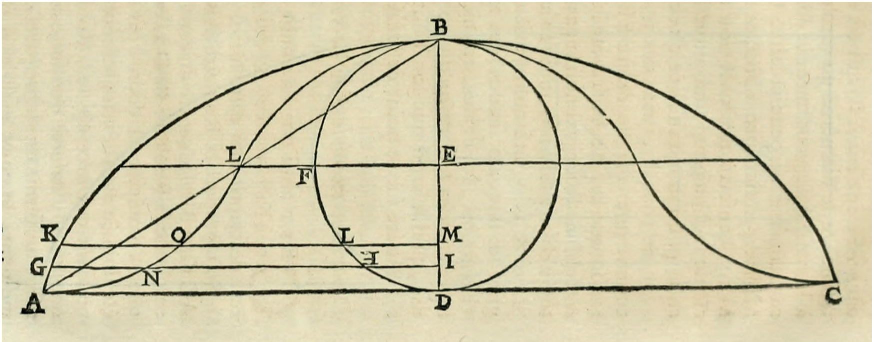
Source : J. Kepler, *Nova stereometria doliorum vinariorum*, 1615, p. B2^r^ (https://archive.org/details/den-kbd-pil-21009000066F-001).

L'expression de Mersenne en son Observation XI quant à la deuxième manière évite délibérément l'approximation de Kepler, et il est utile de la relire dans une orthographe doublement moderne, d'abord par le français, puis par une explication usant de la transcription symbolique :

12. Cette figure apparaît au début de l'œuvre avec le théorème II, qui donne la célèbre valeur approchée de π dans Kepler, 1615.

« En second lieu, par les sinus verses et droits du cercle qui décrit la ligne. Car si on élève des sinus verses sur la ligne décrite sur le plan horizontal par la circonférence du cercle, à laquelle elle est égale, et qu'on applique tellement aux sommets des sinus verses les sinus droits, qu'ils soient tirés à côté gauche et parallèles au plan, la ligne courbe décrite par le cercle passera par toutes les extrémités des sinus droits, comme par autant de points qui montrent la manière de la décrire. » (Mersenne, 1637b, p. 24).





Illus. n°2 et n°3.

Pour que l'on puisse y lire la formation des équations paramétriques de la cycloïde, la figure du dessus (n°2) est réaménagée à partir d'une figure de Roberval publiée en 1693, avec un demi-cercle roulant. Celle du dessous (n°3) se trouve dans ce même recueil, donnant à voir la courbe des sinus verses, du moins sur un intervalle *AC* de longueur *2πR*, courbe placée entre la cycloïde *ABC* et le cercle *DFBD* en position centrale et non pas roulant, devenu ainsi un repère possible. Les tangentes aux extrémités n'apparaissent pas verticales.

Source illus. n°2, n°3 : *Recueils de l'Académie royale des sciences*, vol. 6, Paris, 1693, p. 83 (https://archive.org/details/diversouvrages00robe).

On lit ainsi les équations paramétriques de la courbe (voir (1)), à ceci près qu'elles ne sont pas écrites mais dites selon le vocabulaire de l'époque (illus. n°2 et n°3). Le langage de Mersenne n'est pas exactement celui qu'on aura avec les abscisses et les ordonnées, mais s'en rapproche fortement, surtout dans la gestuelle de description. Ce que l'on écrit avec un signe moins en abs-

cisse, Mersenne l'exprime dans un vocabulaire de direction — « tirés du côté gauche » — qui choquerait Euclide puisqu'il n'y a pas d'orientation chez l'auteur ancien. On reconnaît en la longueur *AA'* sur l'axe celle de l'arc *AG* (illus. n°2). Les définitions d'alors du sinus verse, à savoir $R(1\text{-}\cos\theta)$, et du sinus droit $R\sin\theta$, sont relatives au repérage d'un point sur un cercle de rayon *R*, par un angle θ, celui dont s'est écarté le point du cercle qui roule sur la « ligne décrite sur le plan horizontal ».

(1)
$$R(\theta - \sin\theta)$$
$$R(1 - \cos\theta)$$

> « Car nous étant une fois sur le petit pont de Paris, en regardant les roues d'un chariot traçant sur le pavé, me survient visible et facile occasion de venir à fin de mon intention. Il est notoire, quand une roue a fait un tour entier, sur le pavé plat, que la ligne droite sur laquelle elle a fait un tour entier, est égalée à la circonférence. » (Bovelles, 1547)[13].

Ce n'est pas par seul goût de l'érudition que je cite ci-dessus un mathématicien du XVIe siècle, Charles de Bovelles dans une géométrie plusieurs fois imprimée, quand il décrit le phénomène qui lui paraît essentiel, à savoir l'application d'une roue sur une route. Cet auteur fait volontairement omission du contact ponctuel de la roue et de la route, tellement lié aux paradoxes sur l'infini, pour ne considérer qu'une longueur qui est appliquée sans perte. Je n'ai jamais compris pourquoi cette référence, vaguement indiquée par John Wallis, est considérée comme inutile à l'histoire de la cycloïde en ce qu'il n'y aurait pas de dessin ajouté[14]. Bovelles a mis en évidence une loi de conservation, du genre de celles qui vont se multiplier au XVIIe siècle en mécanique (loi des chocs par exemple), et Mersenne le suit, sans peut-être l'avoir lu. Tel est souvent l'effet de banalités pourtant jusque-là non reconnues, mais dont la mise à jour peut inéluctablement changer les situations.

Mais si une conservation, celle de longueurs, paraît plutôt être une synthèse, comme celle qui dans la chute des graves à la façon de Galilée maintient constante la somme de l'énergie potentielle et de l'énergie cinétique, qu'en est-il de l'effet sur l'analyse en l'occurrence de la cycloïde ?

13. Cet ouvrage ne figure pas dans la bibliothèque personnelle de Roberval. Voir Dhombres, Pétin, & Poutrel, à paraître en juin 2019.
14. Voir les remarques faites au sujet de Bovelles dans la *Correspondance de Mersenne*.

3. L'« analyse » de la courbe se fait par les équations

Dans le texte qui vient d'être cité, Mersenne « analyse » la première équation, celle des abscisses, la décompose en deux parties dont l'une devient (2) en notre écriture symbolique.

(2)
$$X = R\theta$$
$$Y = R(1-\cos\theta)$$

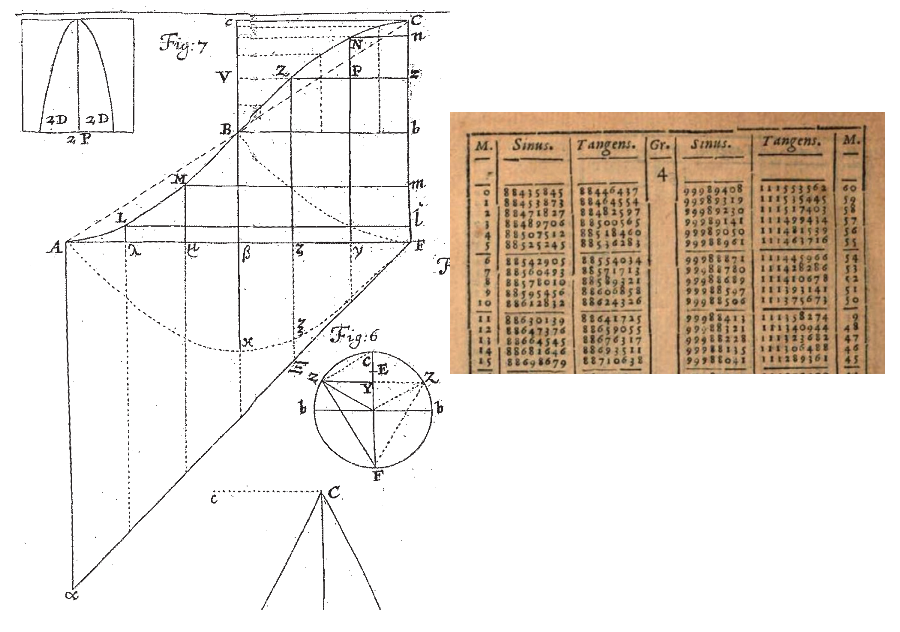
Je dois mieux justifier l'emploi du mot « analyse » et l'apparition d'une variable angulaire en abscisse (comme dans l'exemple de Kepler), alors que l'on pourrait penser qu'il y a seulement jeu de calcul. Il faut procéder avec calme.

L'intervention d'un unique paramètre est ce qui change la notion même de courbe, et cela vaut pour (1) comme pour (2). Ôtant un terme en sinus, de fait en ajoutant si l'on tient compte du signe moins dans la première des lignes de (1), Mersenne est confronté à une expression indécomposable. Il considère comme un tout la définition, que nous avons oubliée aujourd'hui, du sinus verse ($Rsinvers\theta$). Cette courbe du sinus verse allait se dire comme « compagne de la roulette » selon un vocabulaire explicitement voulu par Pascal en 1658, repris par les Anglais, et qui peut en fait provenir de Roberval lui-même. Il nous surprend car on voudrait plutôt voir la cycloïde comme « compagne » de la courbe des sinus verses, laquelle est pour nous une simple sinusoïde décalée par translation verticale. Nous n'avons même pas besoin de figure pour envisager ces choses, tant le dessin des lignes trigonométriques est devenu familier. L'expression du sinus verse dans un cercle de rayon R se voyait alors sous la forme d'une opération tabulée, faisant passer d'une abscisse discrète notée x à une ordonnée notée y. Le rayon R, par exemple 100 000 000, donne le nombre de décimales du sinus entendu en notre sens, huit en l'occurrence (voir une table en illus. n°4b). Ce n'est pas la forme fonctionnelle qui la lie au cosinus qui ferait du sinus verse une fonction, puisque le cosinus lui-même est d'abord une table de nombres, autrement dit n'est envisageable que pour certaines valeurs, celle de la table disponible.

$$y = R(1-\cos\frac{x}{R}) = R\sin vers\frac{x}{R}$$

La primauté familière du sinus et du cosinus aujourd'hui ne pouvait pas l'être en 1637 ; il est impossible de trouver une représentation graphique d'un sinus à cette époque qui donne à en voir la périodicité. Les tables numériques disponibles par l'intermédiaire des logarithmes sont d'une extraordinaire pré-

cision, mais évidemment n'ont pas nécessité d'exhiber la périodicité puisque se limitant à des angles aigus (illus. n°4b). Il convient de remarquer que la terminologie de « compagne de la cycloïde », que l'on trouve encore dans la publication tardive en 1693 de certaines œuvres de Roberval, par exemple à la page 108 de *Divers ouvrages de mathématiques et de physique* (Imprimerie royale, Paris, 1693), n'est attestée qu'à partir du texte de Blaise Pascal d'octobre 1658, qui est son *Histoire de la roulette* (Pascal, 1964-1992, tome 4, p. 221). Accepter que l'expression soit connue auparavant suppose une circulation européenne de la terminologie revendiquée par Roberval, et également une représentation de la courbe. C'est de cette gestation dont je vais me préoccuper maintenant. Et il faudra aussi bien expliquer l'évolution vers une mise en avant du seul sinus



M.	Sinus.	Tangens.	Gr.	Sinus.	Tangens.	M.
			4			
0	88435845	88446437		99989408	111553562	60
1	88453873	88464554		99989319	111535445	59
2	88471827	88482597		99989230	111517403	58
3	88489706	88500565		99989141	111499434	57
4	88507512	88518460		99989050	111481539	56
5	88525245	88536283		99988961	111463716	55
6	88542905	88554034		99988871	111445966	54
7	88560493	88571713		99988780	111428286	53
8	88578010	88589321		99988689	111410678	52
9	88595456	88606858		99988597	111393141	51
10	88612832	88624326		99988506	111375673	50
11	88630139	88641725		99988413	111358274	9
12	88647376	88659055		99988321	111340944	48
13	88664545	88676317		99988228	111323682	47
14	88681646	88693511		99988135	111306488	46
15	88698679	88710638		99988041	111289361	45

Illus. n°4a et 4b.

À gauche dessin de la « compagne de la cycloïde » ou « figure des sinus verses » chez Wallis dans *De Cycloide* en 1659 et à droite extrait d'une table trigonométrique de Jean-Baptiste Morin en 1633, juste pour donner l'état de la précision du calcul des sinus à l'époque du travail de Mersenne et de Roberval.

Source illus. n°4a : https://gallica.bnf.fr. Source illus. n°4b : https://books.google.be.

Il en est directement question chez Wallis dans son *De cycloide* de 1659, et Wallis répond à Pascal qui avait présenté la roulette et parlé de Roberval[15]. La courbe du sinus verse apparaît dessinée dans cette œuvre de Wallis (1659, p. 514, avec la figure numérotée 7), et elle y est explicitement appelée *Figura*

15. La figure est ici reproduite des *Opera mathematica*, tome 1, 1695, p. 557.

sinorum versorum, comme si elle était délivrée d'avoir à être liée à la cycloïde (illus. n°4a). La figure sera reprise l'année suivante dans le *De Motu* de Wallis (1659, p. 752, et figure numérotée 170). Cet auteur maintient donc dans des livres séparés les deux tendances déjà dites, géométrie d'une part et mécanique de l'autre, à propos des effets de la roulette.

Avec l'intervention des équations (2), quoique parlant bien d'analyse j'ai paru oublier l'autre morceau provenant de (1), et qui s'écrit :

(3)
$$X = R\sin\theta$$
$$Y = R\sin vers\theta$$

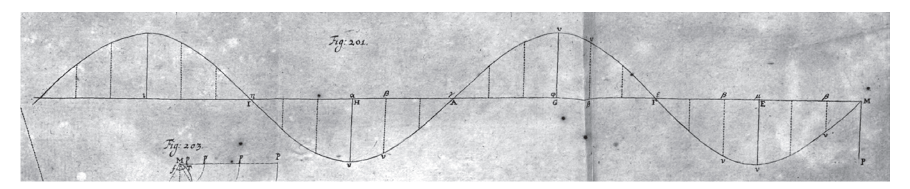
L'analyse n'a de sens que parce que le passage à (1) se fait par une combinaison de (2) (la courbe des sinus verses) et (3). À dire ainsi le cercle avec (3), ou seulement le demi-cercle compte tenu des conventions d'alors sur les angles, on constate un changement dans le repérage des abscisses. En ce que (1) et (2) se lisaient aisément dans le repère *AD*, *AB* de l'ill.1, tandis que (3) requiert, par exemple, le repère *AD*, *DB* de l'illus. n°2. Dans ce dernier repère, toujours orthogonal, les équations (3) avec un angle θ allant jusqu'à quatre droits, fournissent évidemment le cercle central de cette figure. Mais on pourrait, selon la position du cercle, choisir un autre axe vertical pour le demi-cercle sur la gauche qu'on voit avec l'illus. n°2. La lecture a encore plus changé parce que ce qui se met en abscisse — la variable comme nous disons depuis des décennies mais pas depuis toujours car il y faut des repères —, n'est plus le simple déroulé d'un $R\theta$ comme précédemment pour le sinus verse. Intervient le jeu analytique de la paramétrisation des deux coordonnées, dépendant toutes les deux d'une autre donnée, ici l'angle. Telle est la situation phénoménologique la plus intéressante. Non pas le tracé de la courbe, mais que son repérage suscite deux expressions. Elles sont de même nature : à l'angle θ correspond un X et un Y. À ces expressions nous donnons simplement le même nom de fonctions, mais pour éviter d'inévitablement faire appel à une notion encadrée bien plus tard par la théorie des ensembles, il me faut préciser qu'il s'agit de « fonctions numériques d'une variable réelle ». Ai-je bien raison de parler de variable réelle, alors que les dessins exhibés (illus. n°3 ou 4a) ne prennent pas en compte tout l'axe réel ? Car pour sûr il n'entrait aucune généralité dans ce qui n'avait pas d'expression, mais un faisceau d'idées, de calculs ou de tabulations ; tout cela allait prendre corps sans vraiment pouvoir relever d'une définition. Il est possible d'assister ainsi à la genèse non d'une définition propre, mais d'une pratique liant fonction et variable. C'est ce dont raffole l'histoire des sciences d'aujourd'hui. Allons quand même voir !

Je maintiens la formulation d'une analyse de la cycloïde au sens technique d'une décomposition des équations paramétriques. Mais je devrais en vérité parler de deux courbes compagnes de la cycloïde, la courbe des sinus verses d'une part et le cercle de l'autre. Leur « synthèse » est la cycloïde, si du moins je poursuis ce jeu de vocabulaire qui m'a fait utiliser le mot analyse. On pourrait aussi bien parler d'une synthèse de la cycloïde et du cercle donnant le sinus verse. L'important, me semble-t-il, est de constater que l'invention du sinus verse, qui a la forme d'une seule expression, une seule fonction disons-nous aujourd'hui, est un résultat de l'analyse de la courbe cycloïde à partir de sa représentation paramétrique. Avec cette combinatoire des deux courbes, l'analyse impose une multiplicité de repères, alors que l'habitude de la géométrie analytique cartésienne serait de ne s'en servir que d'un, quel qu'il soit. Le repère n'est donc pas un donné *a priori* : ce sont les équations, en l'occurrence les systèmes (1) et (2), qui font naître la nécessité des repères. Et vont éventuellement soulever la question de savoir ce que ces repères imposent à la considération simplement phénoménale d'une courbe.

Avec (3), en échangeant horizontale et verticale pour abscisse et ordonnée, malgré une disposition qui donne une seule valeur avec en abscisse la verticale *BD* (illus. n°3), on ne lit pas le demi-cercle de façon plus directe, car il y a une paramétrisation. Justement la situation de la cycloïde a été réduite à un cas facile, celui des sinus verses au moyen d'une équation directement lisible, et un cas difficile de calcul, mais en fait connu parce que se voyant géométriquement comme un cercle. L'analyse faite ne va pas d'un supposé inconnu mais pris pour un donné à d'autres choses qui seraient connues par ailleurs : elle est organisée à partir d'une forme mère, la fonction numérique. L'analyse des équations par séparation crée une nouvelle perception de la courbe, et prépare un nouvel objet mathématique. J'ai bien dit « prépare ». Car on ne trouve d'abord aucun nom, pas même chez Wallis (illus. n°5). Cette situation est inédite en mathématiques du point de vue épistémologique.

Je citerai plus loin longuement Roberval pour bien montrer combien ce que je viens de dire se lit jusque dans sa gestuelle lorsqu'il parle des courbes, et la banalité fonctionnelle colore la figuration de sa pratique analytique. Mais puisque j'ai parlé de pratique, il est utile de montrer la première apparition d'une sinusoïde, et justifier enfin l'expression de variable réelle utilisée plus tôt. Wallis la donne en 1670 (illus. n°5). Il s'agit seulement d'une allure générale, et le graphe n'est pas numériquement précis puisque ce qui devrait valoir le nombre π, à savoir le rapport d'extension verticale à une extension horizontale sur une période, est à peu près pris égal à 3, 8. Dans ce texte l'allusion est faite à une figure 170, qui est celle exhibée en illus. n°4, le graphe de la fonction sinus

verse réduite à un intervalle et publiée en 1659. Si cette même année Honoré Fabri avait aussi exhibé le graphe réduit du sinus verse, Wallis donne mieux à voir la périodicité du sinus. C'est une première, et donc ainsi la variable réelle est montrée dans tout son champ.



Illus. n°5.

Le graphe de la fonction sinus, tel que fourni par John Wallis en 1671 dans la troisième partie de son *De motu*, juste avant la page 503, repris avec la même numérotation de la figure au tome 1 de ses *Opera* en 1695, et mis à l'italienne dans ce dernier ouvrage (p. 883).

Source : J. Wallis, *Mechanica: sive, De motu, tractatus geometricus*, 1670, planche 8 (https://archive.org/details/ita-bnc-mag-00000889-001).

Une genèse s'en déduit par cette liaison d'une représentation et d'un calcul. La construction de la cycloïde par les équations, pensée forcément périodique comme le disait si fortement Mersenne[16], a permis d'envisager la sinusoïde périodique que donne John Wallis. Roberval tenait à le réaffirmer bien plus tard lorsqu'il fut question de publier ses écrits inédits à l'Académie des sciences. Cette affirmation, qui peut tenir compte du passage du temps et de l'évolution de la pensée mathématique entre 1635 et 1675 pour laquelle le sinus était devenu une notion plus familière, ne peut pas faire oublier la présentation succincte de Mersenne que nous avons lue. Elle avait été la première construction analytique du graphe d'une fonction, celle du sinus verse ; elle fut réalisée en vue d'une autre construction, celle de la cycloïde, et celle-ci reposait non pas sur une seule fonction, mais sur deux, les deux justement requises par la représentation paramétrique. À la façon dont le demi-cercle lui-même est représenté.

Si la première représentation publique du graphe périodique d'une sinusoïde est venue chez John Wallis, c'est qu'il travaillait justement la cycloïde dans sa *Mécanique*[17]. Que connaissait-il de Roberval ? Ce dernier auteur a aussi

16. Mersenne explique la périodicité, même s'il se trompe en mentionnant des demi-ellipses, au lieu d'évoquer seulement une allure : « la boule qui fait cent fois la longueur de sa circonférence en roulant décrit cent moitiés d'Ellipses » (1636, vol. 1, p. 120). Une telle description par répétition ne sera jamais faite au XVIIe siècle pour le sinus (sauf justement par Wallis, illus. n°5) ou pour d'autres fonctions trigonométriques comme le sinus verse.

17. Wallis, 1670-1671, 2 vol. : le 1er vol. contient la 1re et la 2e partie (éd. datée 1670), et le 2e vol. la 3e partie (éd. datée 1671).

donné la courbe du sinus verse, mais en semblant la limiter à un intervalle (illus. n°2 et 3). Je m'avance trop vite dans la voie d'une histoire différente, en évoquant la représentation analytique de la cycloïde, alors que l'on attendait le calcul que tout le monde connaît sur l'aire de l'arche de la cycloïde, et on oublie volontiers tout autre chose. Serait-ce un deuxième versant de l'analyse de la cycloïde ? Je me propose de montrer que non, mais il me faut passer par une meilleure étude des documents disponibles.

4. Un détournement d'intérêt vers la mesure d'une aire

Après avoir laconiquement mais complètement décrit les trois manières de visualiser et construire la cycloïde, Mersenne mentionne que le « sieur Roberval » avait « rencontré une propriété » de cette ligne. S'il la qualifie de « remarquable », c'est quand même autre chose qu'une équation qui est en jeu, avec la mesure d'une aire, celle d'une arche de cycloïde, dite égale à trois fois l'aire du cercle qui a généré la courbe. Assurément cela paraît peu lié à la construction de la courbe ! Mais c'est un problème dont la solution doit surprendre, car le résultat est simple d'une façon inattendue ! Mersenne se lance alors dans une de ces analogies qui ne peuvent qu'étonner et renseignent sur ses idées fixes : si l'on parvenait à « quarrer » l'aire de l'arche, en donnant au verbe son sens euclidien de construction d'un côté de carré à la règle et au compas, le résultat de Roberval donnerait la quadrature du cercle ! On voit la mauvaise passe dans laquelle le minime s'engage, puisque la construction hypothétique de la quadrature de l'arche de cycloïde n'est pas précisée comme devant être effectuée à partir de la seule donnée du rayon du cercle. Et si l'on suppose actée l'arche, donc tracée la courbe, sa seule base, qui est le périmètre du cercle, est une quadrature déjà effectuée[18]. Si ce mathématicien distingué qu'est Roberval — il était professeur royal depuis trois ans — ne pouvait manquer d'avoir réagi à une telle prétention de quadrature, je ne pense pas que l'on puisse en déduire que le calcul paramétrique précédent avec (1), (2) et (3) lui soit dû (Nardi, 1994). Mersenne pourrait être seul à l'origine des équations paramétriques de la cycloïde, grâce à l'invention du roulement sans glissement dont je dois parler.

18. Preuve de l'évolution des esprits, lorsque Christopher Wren en 1658 établit entre deux rédactions du concours lancé par Dettonville, alias Pascal, que la rectification de la cycloïde sur une arche vaut 4 fois le diamètre du cercle, aucune revendication de quadrature ne se manifeste. Au contraire, mais une fois le Calcul établi, il est envisagé divers problèmes revenant à déterminer quels secteurs de la cycloïde s'expriment rationnellement à partir du rayon du cercle, comme on l'a dit précédemment à propos des études des frères Bernoulli notamment (voir note 8).

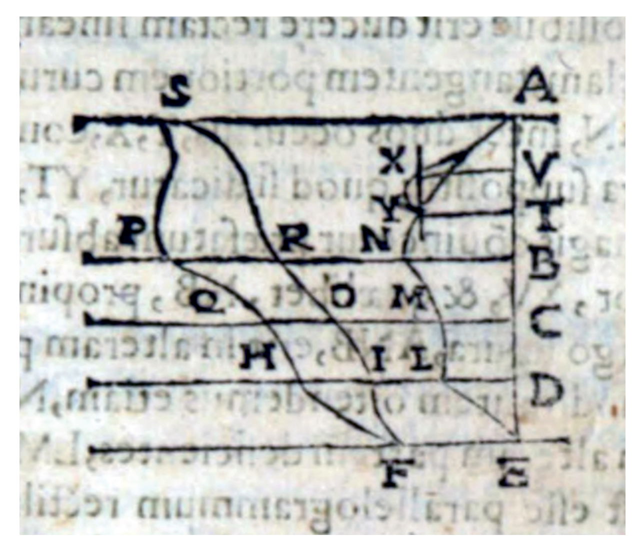
Toutefois ce serait Roberval qui aurait vu le parti qu'il pouvait en tirer, et nous avons suggéré qu'il avait opéré par analyse des équations. Nous allons voir qu'il en tira plusieurs partis, mais peut-être avec une même préoccupation spatiale. Ce qui permet de s'interroger sur l'origine même de la question sur l'aire de l'arche, que Blaise Pascal, mais en 1658, considère comme étant la seule question originale sur la cycloïde, et à laquelle au témoignage cité de Mersenne, Roberval avait effectivement répondu très tôt. On ne peut pas croire sur parole Pascal qui était impliqué de façon polémique dans cette histoire.

Une première explication, souvent implicite chez la plupart des historiens, est de faire porter sur l'air du temps la responsabilité de l'innovation à propos de l'aire de la cycloïde, puisque l'œuvre novatrice de Cavalieri (1635), sa « géométrie des continus par les indivisibles », date de 1635 et qu'il y est essentiellement question de calcul d'aires assez générales, voire de volumes. Une mise au cordeau vertical par déplacement horizontal d'une figure de type fantomatique dans cette géométrie (illus. n°6) donne à penser qu'il n'était pas farfelu de chercher à trouver l'aire de l'arche. Tous les segments horizontaux entre la courbe du sinus verse et la cycloïde, dont quelques-uns sont placés dans une figure (illus. n°2), sont évidemment égaux, chacun à chacun, aux segments dans le demi-cercle. Leur valeur numérique est évidemment le sinus compris comme toujours à cette époque en incluant le rayon du cercle. Tel est aussi bien l'enseignement tiré de la première équation paramétrique. Le principe d'empilement spatial de Torricelli[19] donne automatiquement l'égalité des aires concernées, et donc la valeur de l'aire entre sinus verse et cycloïde égale à l'aire du demi-cercle. Si l'on ajoute que, par principe de symétrie[20], la courbe sinus verse tracée dans la figure divise en deux parties égales le rectangle dont l'aire totale est le double

19. Le principe d'empilement revient à dire que comme dans l'illus. n°6 deux figures dont les segments horizontaux ont respectivement même longueur contiennent des aires égales. Si on ressent encore la gêne qu'il y a à empiler des segments de droite, on est admiratif de la simplification qui fait passer d'une égalité de longueurs à une égalité d'espace par les aires. Tel est le « miracle » des indivisibles … qui n'est pas admis par Roberval et par tant d'autres.

20. Il y a plusieurs façons de saisir cette symétrie, et l'une d'elles est de lire la façon dont la diagonale du rectangle découpe la courbe du sinus verse dans l'illus. n°3. On peut encore utiliser le principe de Torricelli pour établir cette symétrie en comparant dans le haut et le bas, à droite et à gauche de la courbe du sinus verse. À la façon dont Torricelli utilise la même symétrie cette fois pour démontrer l'évidence de la division du rectangle par la diagonale en deux aires égales. Au lieu de la « circulature » de la cycloïde pour l'aire de l'arche, on peut procéder à une « quadrature », puisque l'aire de l'arche est le ¾ de l'aire du rectangle (les côtés sont de mesure $2R$, et $2\pi R$). On ne gagne toutefois rien sur la question de la quadrature du cercle puisque déjà le périmètre a été porté en longueur droite.

de celle du cercle (les côtés valent respectivement πR et $2R$), on déduit la valeur de l'aire de l'arche tout entière comme étant trois fois celle du cercle. Ce résultat allait devenir une sorte d'évidence visuelle, par exemple sur l'illus. n°3, puisqu'avec le cercle central, on voit adjacentes deux aires en positions symétriques, dont chacune a pour valeur l'aire du cercle.



Illus. n°6.

Une figure typique de comparaison d'aires à partir de quelques segments horizontaux dans la « Géométrie des continus par les indivisibles » de Cavalieri donnant à voir le principe de cette géométrie (p. 17 du livre VII de l'édition de 1635).

Source : https://archive.org/details/ita-bnc-mag-00001345-001.

Nous sommes sûrs qu'en 1644 cette symétrie n'était pas la voie utilisée par Torricelli, qui ne fait en aucun cas intervenir la courbe sinus verse, ni ce que j'ai appelé une démarche d'analyse par travail de dissociation sur les équations. L'étude que je veux mener de la correspondance entre Roberval et Torricelli, même par Mersenne interposé, n'aborde que latéralement la question de priorité, et porte sur l'organisation analytique chez Roberval dont Torricelli témoignerait par absence. Roberval affirme que cette courbe fut pour lui l'occasion de plusieurs découvertes, mais ne précise guère plus. Comment le contraindre à mieux parler ?

On est d'abord terrifié par la présentation d'un simple résultat en triple de l'aire du cercle que Roberval donne à lire à Fermat en juin 1638, à partir d'un *majus dato quam in ratione*.

> « C'est à savoir que, de cet espace en ayant ôté l'espace de la roue[21], il y aura même raison du reste à la même roue que de la base à l'espace à la moitié de la circonférence de la roue. »[22]

Il n'y a aucune chance qu'à emberlificoter ainsi les proportions quelque compréhension puisse en résulter !

Démontrer, comme nous venons de le faire, l'établissement de la valeur de l'aire de l'arche, ce n'est utiliser qu'une seule des deux équations paramétriques (1), celle qui pour nous correspond au report des longueurs en abscisses. Est-ce à dire que c'est, à la façon de Cavalieri, faire jouer le flux continu d'une droite horizontale, sans aucunement se préoccuper de ce qui se passe pour la mesure en verticale, donc sans jouer les valeurs des ordonnées, les considérant juste comme une *regula* (une direction) selon l'expression de Cavalieri lui-même ? Pourquoi ne pas faire intervenir en premier la reconnaissance des équations paramétriques valables pour le demi-cercle dans un repère orthogonal comme *AB*, *AC* (illus. n°2), ou *AD*, *DB* (illus. n°3) lorsque l'on se restreint à (3). Dans la section suivante, avec un repérage que je qualifie tout de suite de baroque, et qui est attesté en 1638 chez Fermat, je montre que l'on peut donner une preuve pour l'aire sans utiliser les indivisibles à la façon de Cavalieri. Cette reconnaissance particulière de la représentation paramétrique du cercle ne pouvait avoir une grande ancienneté puisque les lignes trigonométriques comme le sinus verse n'étaient utilisées en astronomie avec une certaine constance que depuis la fin du XVIe siècle, notamment avec l'intervention de Pitiscus[23]. Si par (3) avec le cercle et par (2) avec la courbe des sinus verses, on dispose d'une construction par points de la cycloïde dont les équations sont lues en (1), pourquoi ne déduirait-on pas aussi selon ce procédé la valeur de l'aire de l'arche ?

Je ne suis pas sûr qu'une meilleure connaissance des dates effectives des découvertes de Roberval, même sur la seule aire, suffise à régler le problème de l'origine de sa, ou de ses méthodes. Mersenne, qui parle pour Roberval, semble indiquer que c'est dès 1634, donc dès l'occupation par Roberval d'un poste de professeur royal, que ce dernier aurait réussi la mesure de l'arche. Déclaration

21. L'expression de « roue » désigne ici l'aire du cercle.
22. Il s'agit seulement d'écrire que l'espace *X* satisfait, si on prend Roue pour l'aire du cercle : $X\text{-}Roue/Roue = 2\pi R/\pi R = 2$, de sorte que *X* est égal à trois fois l'aire du cercle. Lettre de Roberval à Fermat du 1er juin 1638. Les lettres importantes pour notre propos sont listées en bibliographie thématique à la fin du présent texte.
23. Roberval possède la table des sinus de Pitiscus, voir Dhombres, Pétin, & Poutrel, à paraître.

qui pourrait n'avoir pour but que d'éviter une « contamination » d'inspiration par les indivisibles de Cavalieri. Elle n'en suggère pas moins le préalable possible des équations paramétriques. Nous ne disposons d'aucun texte pour nous en assurer, en dehors de la déclaration de Mersenne dans l'*Harmonie universelle* datée de 1637 qui ne donne qu'un *terminus ad quem*. Mais de toutes façons Mersenne ne présente pas l'aire de l'arche comme la première chose trouvée ; nous l'avons vu offrir trois constructions, dont celle par les équations paramétriques. Montucla déclare péremptoirement, certes en 1799 en parlant des seules équations paramétriques de la cycloïde :

> « Ces choses là sont les premières que les géomètres se proposèrent. » (Montucla, 1799, 2e vol., partie IV, livre I, p. 53)[24].

L'historien voulait sans doute indiquer, ce qui paraît de bon sens, que l'intérêt fut d'abord dirigé vers une construction méthodique de la cycloïde, avant d'envisager d'autres propriétés métriques comme le calcul d'une aire. En adoptant ici l'idée d'un blocage épistémologique à la façon de Bachelard (1965), aurait-on une mesure du peu d'influence directe des équations paramétriques ? Le bon sens est-il toutefois un bon critère en histoire des sciences ? Les équations paramétriques sont un facteur notable d'interprétation si on scande ou analyse en deux étapes, avec comme première le passage par la « compagne de la cycloïde ». Dans la mesure où cette courbe est effectivement le graphe de la fonction sinus verse, premier cas sans doute d'un dessin réalisé avant que la courbe elle-même ait été pensée. Le graphe qui se place dans l'espace à deux dimensions serait-il seulement une illustration ou devient-il un jeu de l'analyse elle-même. En ce qu'il fait apparaître des représentations particulières, celle des fonctions numériques, qui gèrent un fait général pour les courbes, moyennant le passage aux deux coordonnées.

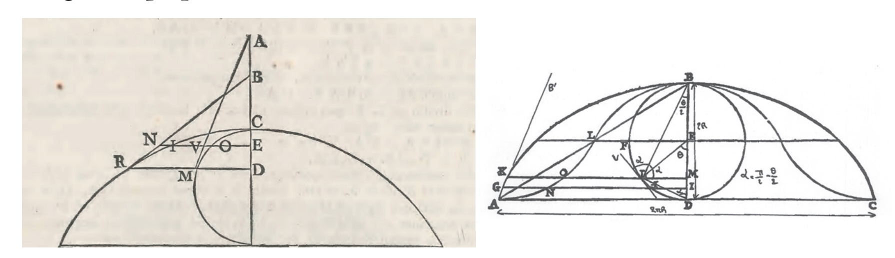
Il est peu probable qu'alors ce graphe ait été reconnu comme étant une sinusoïde déplacée en ordonnée par translation, tout simplement parce qu'on n'avait pas à cette époque de représentation de la fonction sinus, l'habitude étant de n'envisager les sinus que pour des angles entre 0 et 180 degrés. Si les premières descriptions de la cycloïde désignent plusieurs arches et donc font reconnaître une périodicité, les rares dessins ultérieurs jusque vers 1800, ne se préoccupent que d'une seule arche, voire même d'une demi-arche. Par ailleurs on a noté que parler d'équations oblige à penser en termes de repérage, donc à quitter le giron de la géométrie à la façon d'Euclide où les angles sont limités, et ainsi aboutir à l'axe réel entier. C'est dans ce mouvement de représentation que

24. Cette phrase ne figure pas dans l'édition de 1758.

s'instaure la primauté du sinus. Il nous reste donc tout un parcours d'images à effectuer, ce qui était déjà suggéré par la comparaison des deux illustrations (2 et 3), et est alors en jeu la notion de repère. Elle est symptomatique de cet autre mouvement qui est décrit par l'expression de « géométrie analytique ». Mais dans l'adjectif « analytique » le mot « analyse » ne correspond pas au sens précédemment adopté pour les équations paramétriques.

5. Repère classique et repère baroque

La représentation paramétrique, telle qu'elle est décrite par Mersenne en 1637, tient fondamentalement à l'utilisation d'un repère constitué par des axes orthogonaux, par exemple la base *AC* de la cycloïde, droite sur laquelle roule sans glisser le cercle générateur, et un axe vertical *AB*, soit le repère *AC*, *AB* dans la figure 2 qui provient de Roberval.



Illus. n°7a et n°7b.

Figure à gauche tirée des *Varia Opera* de Fermat (p. 71 de l'original sorti en 1679). Cet auteur la dit faite d'après une lettre envoyée par Roberval. À droite, ajout sur cette figure des angles utiles, mais j'ai délibérément placé *M* devenu *T* en dessous de l'horizontale du centre du cercle, alors qu'il est en dessus dans la figure prise dans les *Œuvres de Fermat*.

Source illus. n°7a : https://archive.org/details/variaoperamathe00ferm.

Le roulement sans glissement, une notion requérant la mécanique, est avant tout une conservation de longueur. Or un autre repérage jouant de cette conservation intervient très tôt, au témoignage de Fermat après une lettre que lui avait envoyée Roberval en 1637. Dans cette figure (illus. n°7) la cycloïde est repérée à partir du demi-cercle *CMF*, et de l'axe *HG* ; le point courant *R* de la cycloïde s'obtient à partir de l'abscisse curviligne $\widehat{CM}$ (qui est la longueur de l'arc de cercle), et de l'horizontale *RM*. Les deux longueurs en jeu sont égales. On le déduit facilement de la propriété du roulement sans glissement[25]. Du

25. Cette propriété d'égalité des deux longueurs, l'une droite, l'autre curviligne, se voit facilement en utilisant l'*arcuato*, ou figure en forme de parallélogramme curviligne inventée par Torricelli et qui ne sera pas souvent reproduite, un rectangle dont deux côtés opposés

coup le cercle de mobile qu'il était paraît se figer : l'origine en mécanique s'efface et il doit être clair que le point supérieur du cercle (illus. n°7b) roule sur une droite parallèle à la base, mais avec un glissement.

La propriété de conservation des longueurs une fois acquise peut être considérée comme caractéristique, et fondatrice de la courbe cycloïde, au point que la mécanique n'ait justement plus à intervenir. La démarche d'une propriété devenant origine de définition est un des moteurs de la pratique des mathématiques, quoiqu'en disent les logiciens qui remontent toujours à l'archétype. Comme si ce qui a été pensé en premier devait le rester toujours ! Au contraire, Bachelard, comme Canguilhem, estiment non sans dogmatisme que c'est toujours ce qu'on pense en premier qui doit être éliminé[26]. Ici, à partir d'une propriété métrique, l'autre repérage inscrit la courbe dans la géométrie avec l'égalité d'une longueur curviligne et d'une longueur droite. Mais c'est une géométrie qui accepte de travailler avec des longueurs curvilignes représentées par des droites. Il s'agit d'un début de ce qui portera bien plus tard le nom de « géométrie analytique » et de géométrie différentielle. Encore faut-il trouver de nouveaux outils pour ces géométries ! Le repère en partie curviligne en est un, portant sur des relations métriques ; il n'est certes pas un repère classique, et je le nomme baroque à titre de désignation historiquement pratique dans ce qui suit. On va voir qu'il y a plus. Mais on a au moins une explication technique pour la séparation en deux voies de l'historiographie de la cycloïde.

Dans le repère baroque et si l'on joue de la représentation par un graphe, compte tenu de ladite égalité des longueurs entre un arc et un segment, la cycloïde (ou plutôt une arche seulement de la cycloïde) correspond à une « droite ». En ce que la relation la définissant dans ce repère est une relation linéaire entre les deux variables en abscisse et en ordonnée de repère. Cette remarque pourrait justifier, mieux que sous une forme rhétorique, la déclaration de Pascal qui use en 1658 de ce repérage baroque et assure que la cycloïde serait la ligne la plus commune, après la droite et le cercle[27]. Si l'on note des angles dans cette figure (illus. n°7b), et l'on met aussi le centre *E* du cercle, placé dans

---

sont deux demi-cercles (*Opera geometrica*). Mais Fermat qui utilise le repère baroque, ou peut-être l'a inventé, ne semble pas avoir connaissance de l'*arcuato.* Il a dû raisonner en termes de géométrie seulement pour obtenir l'égalité des deux longueurs.

26. « Le vrai, c'est le dire du scientifique. À quoi le reconnaître ? À ceci qu'il n'est jamais dit premièrement » (Canguilhem, 1977).

27. Blaise Pascal, *Histoire de la roulette, appellée autrement la trochoïde ou la cycloïde, où l'on rapporte par quels degrez on est arrivé à la connaissance de la nature de cette ligne*, texte daté du 10 octobre 1658, et donnant le nouveau thème du concours lancé plus tôt par Pascal. Voir *Œuvres complètes*, IV, 1992, p. 214 et suiv.

une position fixe en *D*, on voit par la géométrie des angles inscrits, que l'angle *BTD*, qui est égal à l'angle *EDT*, est encore égal à l'angle *BTU*, la lettre *V* n'indiquant qu'une direction. Par conséquent *BT* est la bissectrice de l'angle *VTM*. Cette dernière propriété permet d'établir que l'angle *MKB'*, où *B'* indique aussi comme direction celle de la direction de la tangente à la cycloïde, est justement égal à cet angle *BTM*. On en déduit que les droites *TB* et *KB'* sont parallèles, et on dispose ainsi d'une construction facile de la tangente en un point courant de la cycloïde. Une autre façon de dire cette bissectrice est de construire sur l'horizontale et la tangente au cercle un losange dont elle est la diagonale, comme *EPHF* sur un dessin dû à Roberval, donné avec l'illus. n°8 (également visible sur l'illus. n°2). Il y a quelque chose d'étonnant sur ce dernier diagramme : alors que la première construction de la tangente utilise des grandeurs bien définies sur la figure, celle de la diagonale du losange ne requiert à priori aucunement la fixation de la longueur des côtés de ce losange. Cette liberté d'une longueur joue plus loin dans les *triangles robervaliens*. Mais dans l'illus. n°8, la longueur EF est fixée à partir du cercle en position centrale.

Je n'ai pas encore complètement décrit les preuves des différents auteurs sur les résultats énumérés jusqu'ici, sur l'aire ou les tangentes, mais note une dissymétrie apparente. Le repère baroque pourvoit une construction assez facile et géométrique de la tangente, avec intervention de la mécanique qui peut paraître mineure, mais aide grandement à la construction fine de la cycloïde. Alors que nous n'avons pas envisagé de tel résultat à partir du repère orthogonal classique, et que bien peu de textes de Roberval mentionnent cette propriété du parallélisme de la tangente à la corde du cercle (comme si elle était devenue une évidence). Mon propos est alors de montrer comment Roberval a effectivement obtenu une construction de la tangente par le biais du repère classique, comblant un vide démonstratif dans mon exhibition à égalité de deux repères. Alors que nous savons qu'il disposait d'une approche par la décomposition du mouvement en deux composantes égales, d'une part sur l'horizontale, et d'autre part sur la tangente au cercle générateur, qui n'est autre que l'un des axes (au sens généralisé) du repère baroque. On retrouve un rôle possible accordé à ce repère pour la tangente, mais cela requiert en fait la ressource de la mécanique, quoique masquée par le repère baroque. Il paraît pourtant difficile que la composition des mouvements ait aussi suggéré à Roberval une démonstration pour la tangente dans le repère classique. C'est cette possibilité que pourtant je voudrais établir. C'est même là que le dialogue avec Torricelli devient informatif. Toujours en regard de l'analyse des équations paramétriques.

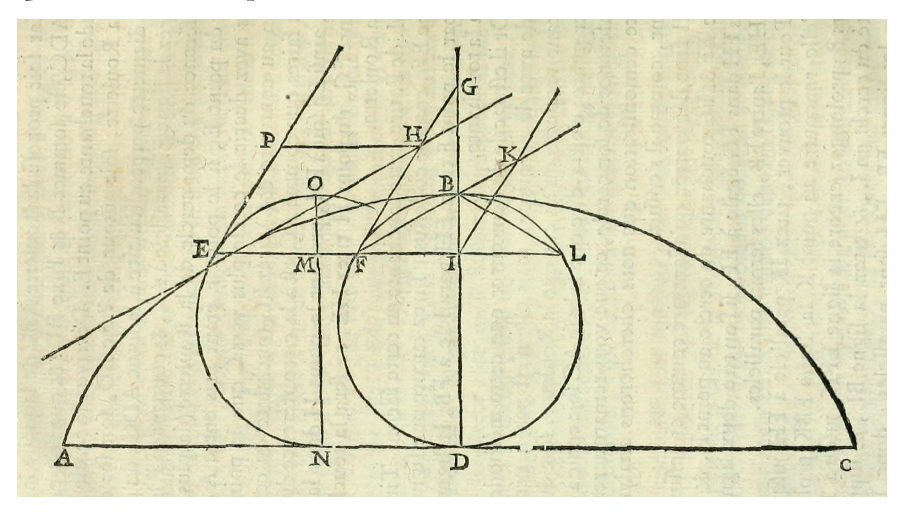
S'il me reste à prouver les trois assertions précédentes, d'une part sur la tangente au point courant de la cycloïde selon deux méthodes, et d'autre part sur l'aire de l'arche dépassant les preuves par symétrie, je ne peux que rencontrer deux aspects *a priori* très différents que le calcul différentiel et intégral unira pourtant dans une même démarche, constituant ainsi le Calcul. Je n'ai pas pour autant l'intention de « prouver » que Roberval aurait pu concevoir d'avance une unité dont il n'a pas pu apprécier la réalisation compte tenu de la date de sa mort. Mon travail consiste, en me servant de documents disponibles, et tout particulièrement de cette indéniable primauté d'origine des équations paramétriques, à tenter d'imaginer comment la juxtaposition du repérage baroque et du repérage classique permet de rendre compte des réussites de Roberval, sans avoir besoin d'invoquer l'unité du Calcul, et sans plus faire des indivisibles à la manière de Cavalieri la seule source possible. Je commence par le cas des tangentes, et ce faisant je n'oublie pas la question des fonctions d'une variable et de la primauté acquise par le sinus (et le cosinus).

6. L'invention des calculs sur les triangles robervaliens

L'une des inventions les plus anciennement reconnues à Roberval est celle de la composition des mouvements[28], il la met en jeu en l'occurrence de la cycloïde à partir d'une conception du mouvement instantané — c'est l'expression que je préfère employer à celle de vitesse — de tout point du cercle générateur comme étant décomposé en deux mouvements, l'un de translation horizontale, et l'autre de rotation forcément dirigée selon la tangente au cercle. Le roulement sans glissement justifie l'égalité numérique des deux mouvements. La composition des deux mouvements numériquement égaux se fait ainsi sur la diagonale de tout losange construit sur les deux directions, l'horizontale et la

28. L'expression « composition des mouvements » ne s'affiche pourtant pas dans la *Mécanique* de Roberval sortie en 1636. Elle joue un rôle majeur dans la lettre véhémente que Roberval écrira à l'intention de Torricelli, peut-être en juillet 1646, qu'il fit lire à Mersenne et qu'il reprit sans l'envoyer à son destinataire. Elle fut trouvée dans ses papiers après son décès, et publiée en 1693 dans *Divers ouvrages de mathématiques et de physique*. Il existe un manuscrit. Je citerai cette lettre, traduisant en français, en l'encadrant par deux dates pour bien manifester les ambiguïtés d'interprétation : *1646 Déclaration de Roberval 1693*. Ceci dit la construction par le losange (illus. n°8) figure dans un manuscrit de Roberval que l'on date du début des années 1640 : *Briefves observations sur la composition des mouvemens ; Et sur le moyen de trouver les touchantes des lignes courbées* (Archives de l'académie des sciences, MPb 3.1a dans la classification de Alan Gabbey).

tangente au cercle. Un dessin de 1693 (illus. n°8) donne à voir un tel losange que l'on ne retrouve pas chez de nombreux auteurs[29].



Illus. n°8.

Le dessin du losange pour la tangente à la cycloïde chez Roberval tel qu'il se trouve dans ses papiers imprimés et publiés en 1693, p. 107, avec une erreur visible puisque le point *E* devrait se trouver à l'intersection de trois lignes. Si du moins Roberval considérait la cycloïde usuelle, celle obtenue par roulement sans glissement. Il peut ici évoquer une cycloïde plus générale, avec un glissement qui se mesure par le rapport de *AC* au périmètre du cercle. Le dessin est pourtant celui de la cycloïde usuelle, sans boucle. L'erreur est vraisemblablement due au graveur à l'Académie des sciences.

Source : *Recueils de l'Académie royale des sciences*, vol. 6, Paris, 1693, p. 80 (https://archive.org/details/diversouvrages00robe).

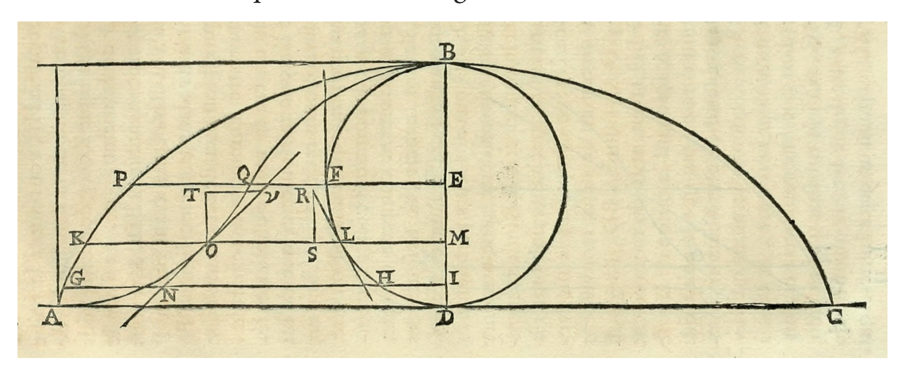
On peut facilement faire coïncider la preuve mécanique de la tangente par Roberval (celle du losange) et celle juste évoquée et qui est mentionnée par Fermat avec le repère baroque, en faisant intervenir la bissectrice de l'angle *AMD*, qui est la droite *CM* (illus. n°7a). Pour expliquer cette coïncidence, je pars de l'exemple de la « compagne de la cycloïde ». Quelle que soit la date à laquelle Roberval se serait intéressé à la construction de la courbe du sinus verse, il ne pouvait évidemment pas percevoir que l'établissement de la tangente en un point courant, qu'il établit à partir de celle à un cercle (illus. n°9), le conduirait à des configurations qui sont lisibles pour nous comme l'échange des sinus et des cosinus lorsqu'on passe à l'opération de dérivation[30]. Et qui n'est pas pour rien dans la primauté finale donnée au sinus et au cosinus. Mais il peut y avoir

29. Il serait utile de sérier les manuscrits, chez Roberval, chez Newton et chez Leibniz, selon que le losange est de côté quelconque ou rattaché à un élément de la figure.

30. Il ne faut pas penser en termes algébriques de + ou de -.

trace de quelque chose issu de Roberval dans la construction donnée par Pascal et que lira Leibniz[31]. Avant d'entrer dans le détail de la construction de la tangente, je tiens à faire ressortir une similarité épistémologique avec l'analyse des équations qui conduisit à séparer cercle et sinus verse pour obtenir la cycloïde. Elle est dans la composition des mouvements qui analyse en deux parties sur les axes, et synthétise selon la loi du parallélogramme.

Voilà donc, en illus. n°9, la figure que Roberval a tracée pour trouver la tangente au sinus verse, et cette figure me sert de pièce à conviction, avec ses deux triangles rectangles *RSL* et *v0*T qui littéralement sautent aux yeux. Je ne les ai jamais vus chez un autre auteur que Roberval avec cette volonté de faire preuve. Chez Barrow, on n'a pas deux tels triangles mais un seul.



Illus. n°9.

La figure de la construction de la tangente au point courant du sinus verse en *0*, p. 109 de la publication à l'Académie des sciences en 1693, dans « Observations sur la composition des mouvemens, et sur le moyen de trouver les touchantes des lignes courbes ». Le point *N* est à l'intersection de la courbe et de la droite *GI*. On trouve cette figure dans des manuscrits de Roberval des années 1640.

Source : *Recueils de l'Académie royale des sciences*, vol. 6, Paris, 1693, p. 84 (https://archive.org/details/diversouvrages00robe).

31. L'histoire du « triangle caractéristique » est transmise de génération en génération. Le dessin par Pascal sur un cercle aurait donné à Leibniz le voyant l'illumination ayant conduit à l'interprétation de la pente de la tangente comme quotient de deux différentielles. Pierre Costabel a montré que ladite illumination prit trois ans pour se concrétiser ! Voir *Œuvre scientifique*, 1964. Ce long temps de maturation a pu être scandé par la lecture de manuscrits de Roberval. Voir aussi la dernière édition des travaux mathématiques de Leibniz de 1673 à 1676, Gottfried Wilhelm Leibniz, *Sämtliche Schriften und Briefe*, Siebente Reihe, *Mathematische Schriften*, Sechster Band, *1673-1676, Arithmetische Kreisquadratur*, 2012. Il y a une autre histoire de ce triangle, en lien encore avec la cycloïde, à partir de Barrow, Gregory et de Newton ; elle a sa source dans un texte de Fermat publié en 1660 (voir Newton, 1960).

Et je donnerai *verbatim* son explication un peu plus loin. Car je veux d'abord interpréter en termes de calcul. Aujourd'hui il est aisé de la suivre (illus. n°9) à partir d'un angle tel que θ = LED, et en mettant en jeu $Rd\theta$, ou X, pour expliquer « l'infiniment petit ». L'angle TED a été aussi bien repéré sur l'illus. 7b. Mais l'utilisant ici je ne fais jouer aucun rôle autre que de notation dans la figure des deux triangles rectangles, avec les lettres de l'illus. n°9. Et si j'obtiens des résultats interprétables en termes de dérivation, cela ne peut pas provenir d'un mouvement conscient de Roberval. Je préfère d'ailleurs donner une lecture avec le terme X au lieu de $Rd\theta$.

On lit les valeurs dans le premier triangle rectangle associé au cercle, en notant que l'angle à la base n'est autre que θ selon :

$$RLS = Rd\theta, LM = Rsin\theta, SL = Rd\theta\cos\theta, RS = Rd\theta\sin\theta$$
$$RLS = X, LM = R\sin\theta, SL = X\cos\theta, RS = X\sin\theta$$

Par conséquent, par l'égalité de TO et RS, une même hauteur si l'on veut, on dispose de $TO = Rd\theta sin\theta = Xsin\theta$. Ce qui convient évidemment aujourd'hui comme élément différentiel pour le sinus verse quand on le lit en hauteur. Encore qu'aujourd'hui on préférera écrire dans un autre ordre $TO = Rsin\theta d\theta$. On se doute que cette disposition finale facilite la perception de l'élimination de $d\theta$ par division. Au XVIIe siècle, cette élimination était la pratique même de la théorie des proportions, et pour celle-ci l'écriture avec X suffit.

Et si ce n'est peut-être pas cette simplification que Roberval cherche à faire deviner, en laissant indécise la longueur même de RL sur la figure, il ne peut que suggérer que X n'interviendra pas au final du calcul qu'il mène. Ceci dit, il traite comme étant indépendantes des longueurs qui sont introduites sur les deux axes orthogonaux et qui n'ont par contre aucune liberté, puisque fixées dès la longueur de RL enregistrée, même lorsqu'elle est dite quelconque. S'affiche pour nous une référence spatiale avec cette conception de l'indépendance des coordonnées ; il nous faudra néanmoins nommer de telles longueurs, verticales ou horizontales, mais nous aurions tout à fait tort de les qualifier d'infinitésimales, même par avance.

Compte tenu du repérage baroque, mais aussi bien de la propriété du roulement sans glissement pour le deuxième triangle, Roberval place en horizontale la longueur $Tv = d\theta = X$. C'est l'ancienne suggestion de Kepler (illus. n°1), qui ne pose aucun problème d'approximation ici, car Tv est un segment de droite, non un arc de cercle. Roberval estime naturel qu'en complétant le triangle rectangle, celui mis à côté de la courbe des sinus verses en son point courant, il

puisse *ipso facto* disposer, par composition pourrions-nous dire quoique nous n'ayons pas encore donné un nom à ce qui est composé, de la direction de la tangente à cette dernière courbe. La complétion tient cette fois au placement vertical de *TO*, longueur égale à la longueur *RS*. Prenant conscience par le calcul que s'effectue une mise dans l'espace à deux dimensions, quelque chose d'autre s'impose qui fait surgir un vocabulaire.

Si l'on pense analytiquement à des changements en termes de longueurs, $X = TV = Rd\theta$ s'interprète comme « variation étalon » de la longueur d'arc circulaire, et aussi bien *RS* que *SL* sont d'autres « variations », construites cette fois, et il en est de même pour *TO* ou *TV*. Ce sont les longueurs qui sont calculées, et non leurs positions. Puisque *TO* a été prise égale à *RS* dans ce calcul mené, on peut qualifier l'expression utilisée de « variation » : *TO* est la « variation » de la longueur *DM* dans la seule mesure où grâce aux équations paramétriques, il s'agit de la même « variation » de la longueur *DM*, soit le sinus verse. De même que *SL* est la « variation » d'une hauteur, laquelle correspond à un sinus droit par ces mêmes équations. Indépendamment justement de ce qui se passe au pied de l'axe de référence pour ces différentes longueurs, ou sur la variable dirions-nous aujourd'hui. Donc si le deuxième triangle se complète par *Ov*, cette droite donne la direction de la tangente cherchée à la courbe des sinus verses. L'analyse séparée des directions, horizontale et verticale, résultat de l'indépendance des deux coordonnées, est synthétisée dans l'espace par la composition des directions. J'ai pris la précaution de ne pas parler de variable pour cette époque, mais de « variations », et celles-ci concernent des longueurs qui font jouer ce que nous appelons des fonctions numériques… alors que la variable désigne autre chose. Puisque c'est la paramétrisation par l'angle[32]. Les « variations » des longueurs, à l'horizontale ou à la verticale, ne sont pas des variations des fonctions en tant que liant une abscisse à une ordonnée : tout tient à la « variation » spatiale et pourtant mesurable nommée *X*.

La tangente de la direction, au sens trigonométrique du mot tangente cette fois, a pour valeur $sin\theta$. Ce résultat quantitatif est évidemment important pour nous puisqu'il signale le jeu analytique des dérivations sur les fonctions sinus et cosinus. Mais prenons garde au fait qu'à cette époque, le sinus comme nombre pur, ou comme rapport de deux longueurs si l'on préfère, n'existe pas. Certes on peut penser le rapport de *R* à $Rsin\theta$, car on dispose seulement géométriquement de ce $Rsin\theta$, et précisément la longueur représentée est ce qui a permis d'interpréter la « variation » de *LM* en base *SL* du petit triangle au point cou-

32. Car ici, pour le moment, le rayon *R* est une constante.

rant du cercle. Quoiqu'il donne grâce à la direction de la tangente le moyen de tracer effectivement une ligne trigonométrique — une première historique —, le résultat numérique sur le deuxième triangle, en sinus pur si on peut dire, ne sert à rien dans le travail de Roberval : il n'a besoin que de l'assurance qu'une construction de la direction de *OV*. Il ne vise pas un calcul, à tort sans doute, mais sa seule possibilité.

Il serait doublement maladroit de parler d'un « triangle caractéristique ». Parce que l'expression, qui vient sous la plume de Leibniz dans l'année 1673 avant la mort de Roberval, et avait déjà fait l'objet de travaux trois ans plus tôt chez Isaac Barrow[33], et on pourrait penser aussi à des choses faites à partir de 1668 par Nicholas Mercator ou James Gregory, a donné lieu à beaucoup d'interprétations qu'il serait nécessaire de discuter avant toute appellation analogue. D'autant que les manuscrits de Leibniz ont fait l'objet récent d'une édition systématique, et que là-aussi les choses ont bougé. L'autre point est que la valeur de la pente des différents triangles n'est pas ce qui compte pour Roberval : il cherche des valeurs des côtés, ce que j'ai appelé des « variations ». Je propose de parler de *triangles robervaliens* en ce qu'ils composent ces « variations », et note aussi qu'ils sont organisés selon le repère classique qui est orthogonal. C'est bien sûr le repère qui prévaudra pour l'étude des fonctions.

Dans ce jeu de dénomination, les « variations » sont liées à des longueurs, toutes à partir d'un étalon, *RL* : ce dernier est de fait lié au seul paramètre ici disponible, l'angle θ. Ce ne sont pas les segments géométriques fixés qui sont en jeu, mais bien leurs longueurs, et on a vu qu'on pouvait les déplacer, pour les repérer selon diverses modalités, jusqu'à celle de porter une longueur sur une courbe. Comment dès lors, et malgré l'absence du mot, ne pas parler de fonctions numériques d'une variable ! Je me contenterai d'évoquer une compréhension pré-fonctionnelle, et j'espère en citant plus loin Roberval faire partager cette conception. Il est clair qu'il n'y a pas fonction d'une abscisse donnant une ordonnée : les deux longueurs en verticale et en horizontale, sont toutes

33. Barrow, 1670. Il y a eu évolution de l'historiographie depuis le travail de J.M. Child en 1916, et les lectures faites lors de la publication de *L'Œuvre scientifique de Pascal* en 1964, mais aussi bien Costabel que Mesnard repoussent une étude systématique de l'influence sur Leibniz du triangle « caractéristique » dessiné par Pascal. Et *a fortiori* celle du *triangle robervalien*. Voir aussi Panza, 2005, Malet, 1989 et Marrone, 2018. J'essaie d'œuvrer dans cette nouvelle voie interprétative, non pas *a priori*, mais en analysant de près quelques textes dont les bien obscurs textes de Roberval. Je n'arriverai sans doute pas à déterminer si cette obscurité de Roberval est voulue, ou provient de difficultés réelles pour lui d'établir un état final de sa pensée. Et suis d'autant plus surpris par la mauvaise qualité de reproduction de ses dessins (voir illus. n°8).

les deux fonctions du même paramètre, l'angle θ, ou mieux $R\theta$. Aussi bien les « variations » comme *SL*, *RS*, *TO* ou *TV,* ne sont pas portées par des obliques, mais elles interviennent selon les deux directions des deux axes. Seule *RL* est sur une oblique, selon la direction de la tangente au cercle : c'est pourtant celle qui est l'étalon de longueur rectiligne. Je m'attelle maintenant à répondre à la question de savoir si Roberval pouvait faire quoi que ce soit d'intéressant avec ces seules relations, sans toutefois disposer du Calcul. Les *triangles robervaliens* de l'illus. n°9 vont me servir à exhiber un calcul qui n'est pas le Calcul.

La seule observation de l'illus. n°9, faite en 1693, ne permet pas d'envisager directement le *triangle robervalien* au point courant de la cycloïde elle-même. Mais si, dans l'esprit même de ce que Roberval vient de donner, et compte tenu de son résultat en losange pour la tangente, on tente d'avancer, on peut en horizontale au point courant de la cycloïde retrancher à la longueur *Tv* d'un des *triangles robervaliens* l'autre longueur *SL*, qui correspond justement à la variation de la longueur *LM*. C'est exactement en cela que consiste le jeu de l'analyse déjà dite sur la cycloïde à partir du cercle et de la courbe du sinus verse. De telle sorte que les deux composantes du *triangle robervalien* de la cycloïde, en horizontale la longueur *Tv – SL*, et en verticale toujours *TO* car il s'agit des « variations » du même *DM,* donnant par composition la direction de la tangente à la cycloïde. Comme ces différentes longueurs sont exprimables à partir de l'angle ou paramètre angulaire par les fonctions trigonométriques, le calcul peut ici intervenir. Ainsi le rapport de *TV-SL* (= $Rd\theta\text{-}R\cos\theta d\theta$) à *TO* (= $R\sin\theta d\theta$), d'où disparaît la notation $Rd\theta$, donc aussi bien *X*, soit $(1\text{-}\cos\theta)/\sin\theta$, donne la tangente de l'angle d'inclinaison de cette direction sur la verticale, qui est l'un des axes du repère classique. Deux transformations très simples sur les lignes trigonométriques ($1\text{-}\cos\theta= 2\sin^2(\theta/2)$ et $\sin\theta= 2\cos(\theta/2)\sin(\theta/2)$) fournissent pour ce rapport la valeur $tg(\theta/2)$. Cette fois une telle information est géométriquement utilisable, puisque l'angle *MCD* (illus. n°7a ou l'angle *TBM* en illus. n°7b) devient la moitié de l'angle θ. Le calcul de la pente rend compte pour la direction de la tangente à la cycloïde de sa propriété de bissectrice de l'angle *AMD*, ou encore du parallélisme de cette direction à la corde *CM* (illus. n°7a où elle n'est pas tracée, mais illus. n°7b où elle l'est). De la même façon on rend compte de la construction, toujours associée au nom de Roberval, d'un losange sur l'horizontale et sur une parallèle à la tangente au cercle générateur dont la diagonale donne la tangente à la cycloïde (illus. n°8). Tout est dit !

Les calculs qui jouent de la trigonométrie ne sont pas effectués de cette manière par Roberval. Il utilise les seules propositions d'Euclide, et multiplie des

comparaisons de triangles[34]. Ce qui est certes long, mais doit aussi bien être considéré comme un calcul, et il aboutit aux deux possibilités déjà dites, avec la bissectrice, ou encore la corde du cercle. Il devient urgent de citer Roberval, mais seulement dans ce qui paraît essentiel. J'ai bien annoncé que je ne le suivais pas fidèlement parce que je voulais commencer par une interprétation des calculs. On lira maintenant une partie du texte fidèlement retranscrit de Roberval dans un des manuscrits disponibles. Il suffit de remplacer ses « mouvements » par les « variations » que j'ai utilisées, tout en manifestant l'indépendance de ce qui se passe selon les deux axes orthogonaux du repère, que Roberval dit par des verbes gestuels comme « monter », ou « tirer ». Ces verbes sont en convenance avec une symbolisation analytique donnée au graphe, et le dernier verbe n'est pas emprunté au mouvement, mais à la pratique du dessin.

7. Un texte de Roberval sur la tangente à la courbe partiellement représentée du sinus verse

> « C'est ainsi que l'a voulu nommer Monsieur de Roberval, qui l'a inventée, et qui en a imaginé l'hypothèse, et la description en cette sorte. »[35]

Ainsi débute l'un des manuscrits disponibles sur le sinus verse, et on pourrait accuser l'élève ou copiste, François du Verdus, d'avoir allongé le texte de Roberval. J'aurais pu ne citer que l'un des paragraphes pour mieux faire valoir mon interprétation de type fonctionnel. Je le signale en le mettant en plus gros caractères pour le lecteur pressé, mais je préfère donner à voir l'entourage général pour montrer la lente gestation de la pensée de Roberval, et j'ajoute des

34. Je donne juste quelques lignes extraites des longues phrases de Roberval sur ces triangles dans son texte sur les mouvements composés : « Prolongez encore la ligne *EFIL* jusqu'à l'autre côté du cercle en *L*, et tirez la ligne *BL*, et supposans que les lignes *FB*, *EH* sont parallèles ; donc l'angle *EHF* est égal à l'angle *FKI*. Mais par la construction l'angle *HEF* est égal à l'angle *EHF* pour ce que nous aurons pris *FH* égale à *EF*. Il faut donc montrer… » (Exemple 11, de la roulette). La reconnaissance de la trigonométrie comme discipline autant valable que la géométrie d'Euclide ne vint qu'avec les formules d'Euler sur l'exponentielle complexe en 1748. Peut-on à ce moment-là parler encore avec la trigonométrie de voie géométrique.

35. D'après le Ms 9544 de la BNF, nouv. acq., qui est un texte assez voisin de celui qui sera publié par l'Académie, *Divers ouvrages*, Paris, 1693, p. 109. La figure de référence est l'illus. n°9, où symptomatiquement le segment *LB* n'est pas tracé qui donne la direction de la tangente à la cycloïde en *K*.

notes explicatives, mais je ne le fais justement pas à l'occasion de la partie agrandie qui se suffit à elle-même.

> « Soit proposée la roulette *ABC* de laquelle la base est *AC*, l'axe *BD*, le centre du cercle dans l'axe est E, le cercle de la roulette *BFD* à l'entour de l'axe. Supposons que la roulette est décrite par la deuxième façon, qui a été décrite dans l'exemple précédent[36], c'est à savoir que pendant que le cercle de la roulette glisse depuis *A* jusqu'en *C*, en sorte que son centre décrive d'un mouvement uniforme une ligne parallèle et égale à *AC*, qu'en même temps le point mobile *A* parcoure par un mouvement uniforme[37] la circonférence du cercle, et décrive la roulette par le mouvement composé de ces deux. Imaginons maintenant que pendant que ce point parcourt ainsi la circonférence *DFB*, qu'un autre point *A* ou *D* mobile dans le diamètre du cercle qui est toujours perpendiculaire à *AC*, monte le long de ce diamètre de *D* vers *B* d'un mouvement inégal[38], de sorte qu'il soit toujours également éloigné de la base *AC*, comme est le point qui décrit la roulette, c'est-à-dire qu'ayant tiré du point de la roulette comme *G*, la ligne *GHI* coupant la circonférence du cercle en *H* et l'axe en *I*, que lorsque le point mobile que décrit la roulette se rencontre en *G* dans la roulette, c'est-à-dire en *H* dans le cercle, le point qui décrit cette compagne se rencontre en *I* dans l'axe.[39]
>
> De même tirant par un autre point *K* la parallèle à la base, *KLM* coupant la circonférence *BLHD* en *L* et le diamètre *BD* en *M*, que lorsque le point de la roulette est en *L*, c'est-à-dire dans le cercle en même endroit que *L*, que le point de la compagne de la roulette est dans *BD* en même endroit que *M*, et ainsi des autres[40].

36. Cette manière est celle par laquelle la tangente est obtenue par parallélisme à la corde du cercle générateur.
37. L'uniformité joue par rapport au paramètre θ.
38. Aujourd'hui, au lieu de mouvement inégal, nous parlerions d'une fonction numérique, qui d'ailleurs serait décrite comme le sinus verse de l'angle de la paramétrisation de la cycloïde, multiplié bien sûr par le rayon du cercle. Les limitations sur les valeurs de l'angle font hésiter sur la qualification de fonction d'une variable réelle, puisque Lagrange encore vers 1800 imposait la conception d'une fonction partout définie. Le vocabulaire du mouvement manifeste l'indépendance entre ce qui se passe en horizontale (abscisse) et en verticale (ordonnée).
39. Ce texte est un bel exemple de description de l'usage des coordonnées pour le cercle, refaisant pour *K* et les points alignés sur *KM*, ce qui est fait avec *G* et les points alignés sur *HI*.
40. Il peut paraître répétitif, du point de vue fonctionnel, que Roberval passe aux points de cette seconde ligne *KM*. En fait, il est habitué aux usages de la théorie des proportions où l'on prend toujours un couple de points. Cependant il ne peut rien dire, dans cette théorie ancienne, de la comparaison des rapports qui sont donnés par des sinus verses, et ne peut

D'où il s'ensuit que pour dessiner cette ligne, ayant tiré du point de la roulette des lignes parallèles à *AC*, et si dans chacune de ces lignes à commencer par les points de la roulette, on prend une ligne égale à la portion de la même ligne comprise entre la demi-circonférence du cercle, et son axe, l'on aura les points par lesquels cette ligne est décrite. Ainsi tirant, comme nous avons dit la ligne *GHI*, si dans la même ligne nous prenons *GN* égale à *HI*, nous aurons le point *N* par lequel passe la compagne de la trochoïde. De même prenant dans *KLM* la ligne *KO* égale à *LM*, vous aurez[41] un autre point *O* de la même ligne ; et si par le centre *E* vous tirez *EF* perpendiculaire à *BD*, et que dans la prolongée en *P* jusqu'à la roulette, si de *P* vous prenez vers *F* la ligne[42] *PQ* égale à *EF*, dans la même ligne *PF* vous aurez le point *Q*, qui est le milieu de cette compagne, et auquel elle change de courbure, comme vous remarquerez mieux par après. Or ça été la même chose de décrire le cercle autour de l'axe de la roulette, que de lui donner toutes les différences positions qu'il a en glissant sur la ligne *AC*, ce qui a déjà été remarqué dans la roulette[43].

Cela posé, vous voyez que le point qui décrit cette ligne, en est porté par un mouvement composé de deux droits, l'un uniforme, l'autre inégal, et desquels les directions sont perpendiculaires l'une à l'autre, se produisant dans les lignes *CD*, *DB*, ou dans leurs parallèles.

Et pour ce que le point qui décrit cette ligne se montre de la même façon que celui qui, dans la roulette, monte dans le demi-cercle, tirant la touchante du point réciproque[44] dans le demi-cercle et composant le mouvement dont elle est la direction des deux mouvements droits,

---

que parler de mouvement « inégal » puisqu'il n'y a pas proportionnalité. On assiste à la découverte du maniement du graphe d'une fonction dans ce qu'il permet d'innover, allant au-delà des calculs usuels du linéaire et du quadratique.

41. Le passage du « nous » au « vous » attesterait le caractère oral de leçons données par Roberval à du Verdus. Cet aspect n'en rend que plus intéressant ce témoignage, car il est rare en histoire des mathématiques de disposer du résultat d'un enseignement plutôt que de la mise en forme par l'auteur lui-même.

42. Dans le manuscrit au lieu du point *Q* de la figure, il est écrit un point *S*. Comme il n'y pas de figure jointe au manuscrit utilisé ici, j'ai préféré écrire *Q*, qui correspond à la figure fournie dans le recueil académique de 1693 (illus. n°9).

43. J'interprète cette phrase en tant que description d'un repérage par le seul cercle central ; elle indique l'abandon de la figure variable du cercle roulant sur l'axe *AC*. Ce n'est pas encore tout à fait le repérage baroque décrit plus haut.

44. Le point dit réciproque du point courant *G* de la roulette, ou *N* de la compagne, est le point *H* du cercle. Là encore se fait l'apprentissage du maniement des ordonnées et des abscisses. Et se confirme le genre d'une leçon orale adaptée ensuite à l'écrit par un auditeur.

l'un parallèle à *AD*, l'autre à *BD*, on aura dans la ligne parallèle à *BD* la quantité du mouvement qui fait monter ce point ; et sachant la raison de la base *AC* à la circonférence du cercle[45], puisque le point qui dessine la compagne de la roulette est porté d'un mouvement uniforme égal à *AC*, comme le point qui dessine la roulette a un mouvement uniforme égal à ladite circonférence, si on fait que comme la circonférence du cercle est à *AC*, ainsi la touchante du cercle soit à une ligne droite, cette ligne sera la quantité du mouvement parallèle à *AC* du point de cette ligne compagne, qui est réciproque à celui du cercle auquel on a tiré la touchante[46].

Par exemple soit la roulette *ABC* du 1er genre, c'est-à-dire que sa base *AC* soit égale à la circonférence de son cercle, et le reste comme il a été dit ; pour tirer la touchante de cette ligne au point *O*, je tire au point *L* du cercle réciproque du point *O*, la touchante du cercle *LR*, et je compose le mouvement *LR* des deux *RS*, *SL*, dont l'un *RS* soit parallèle à *RD*. Puis comparant les mouvements du point *O* à ceux du point *L*, puisque par supposition le point *O* monte autant que le point *L*, je tire *OT* parallèle et égale à RS. Ce sera la direction et la quantité de ce premier mouvement du point *O*. Puis après pour ce que le point *O* a dans une ligne parallèle à *AC* un mouvement égal à celui du point *L* le long de la circonférence de son cercle, c'est-à-dire un mouvement égal à celui du point *L* le long de la touchante *LR*, ayant tiré *TV* parallèle à *AC* et égale à *LR*, j'aurai la direction et la raison des deux mouvements du point *O*, et partant la ligne *OV* sera la touchante de cette ligne au point *O* ; ce qu'il fallait faire. »

Si les calculs sur les triangles rectangles, donc dans le plan ou espace à deux dimensions, ceux que j'ai présentés en utilisant la trigonométrie et ses

45. La raison va être l'unité en fait parce qu'il y aura égalité de la longueur *AC* au périmètre du cercle (roulement sans glissement, ou roulette du 1er genre). Mais Roberval n'oublie pas qu'il peut considérer aussi les roulettes raccourcies ou allongées. La généralisation des roulettes est signalée dès le texte de Mersenne de 1637, et on a l'impression que l'on ignorait cette idée dans la tradition de Galilée. Ce souci de généralité avant tout, alors que l'on n'a pas explicité vraiment une pensée, est souvent un des handicaps de bien des exposés mathématiques. Du Verdus aurait-il oublié les explications intermédiaires de Roberval ? Ceci dit, du point de vue analytique, dans le repère baroque les roulettes généralisées sont tout autant des « droites » que la roulette ordinaire.

46. La phrase indique que le mouvement horizontal du point courant de la roulette (ici en *O*) correspond au mouvement du point *L* sur le cercle.

« lignes » ou ceux que Roberval a effectués et que j'ai épargnés au lecteur car ils sont longs, purement géométriques et donc sans trigonométrie, ne font pas intervenir les propriétés de la dérivée des diverses fonctions en jeu représentées par des longueurs géométriques, on les retrouve *stricto sensu* si on dispose de cette dérivation, aussi bien pour le sinus verse que pour le sinus droit. Il est donc temps de procéder à l'extraction des deux seules propriétés intervenues sur les longueurs en jeu dans les *triangles robervaliens*, et de poser une question, qui viendra comme une troisième remarque.

1° D'une part, effet du repérage classique, il y a l'indépendance entre les « variations » en verticale et en horizontale. Peut-être serait plus neutre le mot « éléments » induisant l'idée d'êtres géométriques soumis à ne valoir que par les proportions qu'ils entretiennent, sans pour autant devoir penser à un infiniment petit. Le fait de base est *RL*, une longueur d'arc circulaire, qui d'hypoténuse dans un *triangle robervalien* associé au cercle, est reportée en horizontale pour permettre un autre *triangle robervalien* pour le sinus verse, la courbe que Roberval cherche à mieux construire. La longueur *RL* peut être librement choisie. Ce qui compte est l'obtention des deux côtés *RS* et *SL* par projection orthogonale. Si ce passage tient à la définition mécanique de la cycloïde par roulement sans glissement, il peut se dire aussi bien par utilisation du repère baroque qui élimine l'idée mécanique, en permettant une étude purement analytique de la courbe, moyennant l'élargissement de la géométrie aux longueurs curvilignes.

2° En second, et c'est le plus important, pour le calcul est requis le caractère additif (au sens large qui est ici une soustraction) de ces variations mises à l'horizontale lorsqu'elles portent sur des « fonctions » différentes. Voilà ce qui permet d'envisager *TV-SL*, où il y a un élément d'abscisse curviligne et un autre, *SL*, portant sur la « fonction » sinus que l'on voit en *LM*. Du point de vue analytique, cette additivité des éléments ou variations annonce, pour nous, le caractère additif des différentielles aussi bien que celui des dérivées. Pour Roberval, il s'agit d'une règle de calcul par composition sur ses *triangles*. Il n'entre aucune idée d'approximation, ou de passage à la limite.

3° Il faudrait ici que je qualifie définitivement les éléments horizontaux et verticaux qui interviennent dans les *triangles robervaliens*. Est-il possible de décider en faveur des variations de « fonctions numériques d'une variable réelle » ? On en sera bien mieux persuadé par l'examen de ce que Roberval fait de la question autre, celle des aires. On s'aperçoit néanmoins qu'il n'y a pas de calcul général dans ce manuscrit qui date de la décennie débutant en 1640, et évidemment pas le Calcul. Car ce qui est en cause est la possibilité

de combinaison de choses connues, les deux tangentes en deux points corrélés de deux courbes, pour en trouver une troisième par voie d'addition. Le calcul de fait porte sur le connu aussi bien que sur ce qui est cherché. Cet aspect, qui est la pratique de l'analyse, est peut-être le plus important si l'on veut voir une influence sur le Calcul à venir.

4° Roberval aboutit à une construction graphique, mais pas à un calcul général ; on ne peut pas dire qu'il privilégie le sinus sur le sinus verse. Tout simplement parce qu'il ne voit pas la simplicité des relations entre sinus et cosinus quand on prend la tangente au cercle.

Examinons à ce stade un scénario pour ces découvertes, et plusieurs en fait.

8. Des scenari possibles

Pour trouver les tangentes le passage a été effectué du cercle au sinus verse, puis à la cycloïde, moyennant les *triangles robervaliens*. Mais on pourrait aussi bien aller de la cycloïde au sinus verse, moyennant bien sûr la connaissance de la tangente à la cycloïde et celle du cercle. De sorte que dans le texte de Roberval tel que publié en 1693, et qui vient après le travail sur la tangente à la cycloïde, on ne peut pas assurer que la courbe du sinus verse ait bien été l'intermédiaire obligé pour la cycloïde dans la recherche des tangentes. Il y a juste un lien fait entre tangentes, indépendant de la qualification de la courbe comme compagne de la cycloïde. Ce lien paraît moins être une étape qu'un résultat final, dit comme « composition des mouvements », sans pourtant qu'il y ait une quelconque relation avec la mécanique.

Estimer pourtant que la courbe des sinus verses ne provienne pas des équations paramétriques rendrait difficile à comprendre le cas que Wallis et Pascal font ensuite de cette courbe, aussi bien que la volonté de Roberval à la fin de sa vie de la maintenir en vue d'une publication, alors même qu'il semble être allé beaucoup plus loin. Pascal manifeste aussi sa dette à Roberval pour ce qui est des tangentes, alors que lui-même, comme le faisait justement remarquer François Russo, ne s'intéresse pas aux tangentes (Costabel & Taton, 1964). Pascal aurait donc subi ce que j'ai en premier qualifié de détournement d'intérêt vers les aires, puis les volumes, et les centres de gravité[47]. J'y reviendrai plus loin.

47. Je n'essaie pas, ici, de discuter l'intérêt qu'il y avait à chercher ces centres de gravité et ces volumes. Mais constate que ces centres relevaient des mêmes questions soulevées par la cycloïde, et on est un peu étonné que Roberval semble les dédaigner. Alors que du point du vue fonctionnel ces questions de mécanique et de l'espace lui permettraient d'enrichir

Un scénario désormais possible est une découverte précoce de la généralité que comportent les *triangles robervaliens*, une fois que Roberval eût l'idée d'analyser les équations paramétriques de la cycloïde en les divisant en deux, en abscisse, $Rd\vartheta$ d'une part et $Rsin\vartheta$ de l'autre, donc avant 1640. Cette analyse de la courbe fait surgir l'intérêt pour la courbe des sinus verses, pour sa périodicité aussi bien puisque naturelle pour la roulette, et ainsi la variable réelle, et pour la recherche de moyens en vue de la construire finement. Elle lui donne l'idée des « variations » ou « éléments » et des triangles *robervaliens*. Ceux-ci poursuivis après des calculs qui ne sortent pas de la géométrie à la façon d'Euclide puisqu'il n'y a pas de trigonométrie et qu'une longueur est seulement indéterminée, le conduisent en déplaçant horizontalement une longueur à construire par le losange la tangente au point courant de la cycloïde (illus. n°8). Avec ce résultat le *triangle robervalien* s'efface. À la manière dont les différentielles vont s'effacer pour le calcul effectif des tangentes. Mais c'est bien en utilisant le repère orthogonal que la tangente à la cycloïde fut trouvée, en liant les calculs sur les triangles que résument l'illus. n°8. Voilà ce que je m'étais proposé de prouver sur la tangente à partir du repère classique.

Pour critiquer ma tentative de reconstitution d'une pensée, avec les aléas usuels sur une hypothèse qui tourne autour de la notion de fonction numérique, il me faut passer à l'autre versant du Calcul, qui est le versant intégral, celui qui a été dit premier depuis Blaise Pascal. Cela peut se faire, et on pourra voir que les indivisibles à la manière de Cavalieri qui interviennent de façon publique en 1635 purent ne jouer qu'un rôle mineur, servant plus à illustrer qu'à créer cet autre langage analytique. On ne peut pas parler de va-et-vient de l'aire à la tangente, de l'intégrale aux *triangles robervaliens*, mais bien plus d'une unité d'inspiration des deux questions en raison des équations paramétriques. Car c'est un fait bien surprenant que Mersenne ne fasse connaître que le résultat sur l'aire quand il l'annonce dans l'*Harmonie universelle.* Roberval s'étend bien plus (en 1646 sans doute) sur sa propre façon de procéder. Il est censé s'adresser à Torricelli, et raconte la genèse de la « composition des mouvements ».

> « Voyons donc maintenant pourquoi je suis affligé lorsque vous objectez à une proposition peut-être non démontrée avant la mort de Galilée, qui cependant a vécu jusqu'en 1642, alors que déjà je vous avais écrit l'avoir inventée douze années s'étant écoulées depuis. De sorte qu'alors qu'un seul témoin suffit pour la vérité, vous dénigrez toute confiance en moi qui dispose de tant de témoins. Et cette théo-

sa collection de « fonctions numériques » sur lesquelles travailler, comme on le verra plus loin. Voir sa lettre, *1646 Déclaration de Roberval 1693.*

rie de l'infini (permettez moi de me servir de ce vocabulaire dans cette lettre pour ensuite l'abandonner) étant assez bien développée à cette époque, je m'appliquai d'en adopter l'esprit pour les tangentes aux courbes[48]. Et d'abord par la force de l'Analyse, j'ai trouvé une certaine méthode qui alors juste inventée ne me parut pas universelle, bien que longtemps après elle ait été reconnue comme telle. Assurément je cherchais cette universalité, et dédaignais (comme tous) les méthodes particulières. Ce furent nos trochoïdes qui me donnèrent l'occasion de regarder avec attention la composition des mouvements. Telle fut l'occasion, et vers l'année 1636 nous avons rendu publique une méthode universelle des tangentes qui s'en déduisait. Voilà ce qui ressort de la matière de nos leçons, et notre très noble disciple M. du Verdus les a transcrites, et distribuées à beaucoup. C'est pourquoi depuis longtemps une telle théorie nous est reconnue par la confiance publique, et des témoignages nombreux sont disponibles. »[49]

9. Le rôle de Fermat, et d'une communauté savante, à propos du passage par les sommes d'arcs

Comme on sait l'époque intervient d'une façon très précise et l'année 1638 s'avère cruciale pour la cycloïde, avec des interventions auprès de Mersenne, provenant aussi bien de Descartes que de Fermat. Tous les deux apportent du tout nouveau, qui ne sera pas tout de suite rendu public par le livre, mais sera enregistré, discuté, et commenté dans le cadre des réunions de Mersenne, et très vraisemblablement transmis en Italie, selon un processus plus lent. Roberval semble même dire qu'il y eut lecture à Paris d'un texte purement mathématique et discussion à ce sujet, ce qui serait presqu'une première historique[50]. En

48. Roberval assure que « l'esprit » de la théorie de l'infini qu'il dit pratiquer est proche des indivisibles, et sert d'abord aux tangentes. Mais que le calcul des aires vint ensuite. De sorte qu'il peut assurer que la méthode pour les tangentes fut publiée en 1636. On peut douter qu'elle ait été générale en cette première année des contacts avec Fermat, et elle devait être restreinte à la cycloïde, et à la courbe des sinus verses.

49. *1646 Déclaration de Roberval 1693* (trad. J. D.). J'ai cité plus haut (Ms 9544) la phrase de François du Verdus placée en tête du manuscrit que l'on situe dans les années 1640, alors que Roberval semble dater les choses de 1636, à moins qu'il n'avance jusqu'à 1630.

50. Voilà un témoignage particulièrement riche pour les *science studies* qui sont à l'affut de telles aventures, et sans doute une description intéressante pour le travail effectif à l'Académie mathématique de Mersenne. Il permet un prolongement pratique aux réflexions de Norbert Elias d'avant 1990, dégageant l'histoire des sciences de l'opposition entre histoire interne et externe. Voir Elias, 2016.

tout cas, et dans la vindicte d'une querelle de priorité, Roberval fait jouer avec force le « nous » pour désigner ceux autour de Mersenne. Il y a justement un autre « nous » qui est forcément un « vous », et désigne la même réunion, sinon la même militance aussi de Torricelli, avec Michelangelo Ricci, le futur cardinal, ou Raphaël Maggiotti ; ils sont vus comme les disciples de Galilée, ce qui crée automatiquement une référence d'une autre nature.

> « De façon sûre je me suis servi de ma méthode depuis 1637, et par elle j'avais déjà trouvé les centres de gravité de toutes les surfaces planes paraboliques et de celles en trois dimensions ; et de ces centres qui concernent les demi-fuseaux paraboliques. Je l'avais annoncé par cette lettre de 1643 au Révérend Père Mersenne[51], dans laquelle j'annonçais vos intentions, année qui fut la première où les Parisiens entendirent parler de Torricelli. Cela, je l'assure, je l'ai annoncé plus d'un an avant que ne paraisse votre méthode, dont je ne doute pas de l'ingéniosité. Et parut enfin ce qui a été peut-être trouvé par vous, et par nous en commun avec d'autres réunis à nous[52]. Mais imagine, ce qui n'est pas vrai, que la vôtre ait été trouvée avant 1644. Imagine encore, ce qui n'est pas plus vrai, que votre méthode soit en cohérence avec la nôtre et soit intégralement la nôtre. Qu'en résulterait-il ? Répudierions-nous du coup la nôtre, ne la disant comme nôtre en aucun cas, celle dont depuis sept années déjà avant 1644, et bien plus, nous avions fait usage, la réclamant nôtre. Ne nous garantirions-nous pas plutôt à bon droit par ce qui avait été auparavant écrit ? Et qui que ce soit qui intervienne, n'affirmerions-nous pas la nôtre comme nôtre, selon notre loi, puisque personne ne pourrait nier que nous ne possédions de telles choses, ou que la prescription d'un seul jour aurait l'avantage ? »[53]

Confrontés à des mots aussi vifs, on doit penser que les communautés savantes ne s'établissent pas sans réelles difficultés. Et Roberval insiste pour exprimer qu'il ne faut plus se fier à des intermédiaires, fussent-ils aussi diligents que Mersenne. On a là une forte critique de la vie intellectuelle de groupes dans lesquels certains prennent des responsabilités de diffusion ou de commentaires.

51. Il s'agit de la lettre de Roberval à Mersenne de juillet 1643, et Roberval prétendra avoir été le premier à suggérer l'importance de Torricelli.
52. L'usage du « nous », différent de celui précédent (cf. note 41) est une mention précieuse d'un travail technique commun autour de Mersenne sur des choses mathématiques.
53. *1646 Déclaration de Roberval 1693.*

> « D'où ce litige suscité entre nous, de peu d'importance en soi, puisque portant sur des bagatelles comme tu le dis assez souvent[54]. C'est pourquoi, pour qu'à l'avenir il n'arrive pas quelque chose de semblable si un tel commerce littéraire se poursuivait entre nous, je vous prie, quoi que ce soit qui vous soit envoyé au sujet d'une proposition mathématique dont la discussion me concerne, de n'avoir confiance en une lettre de quiconque, si ce n'est qu'elle soit signée de ma main. Ainsi sera que je ne tienne pour interprétés selon mon sens que mes seuls écrits, et non ceux par des autres. Car, que cela soit dit pour la paix entre amis, en cette matière j'ai pour habitude de ne me fier qu'à moi seul, ayant depuis longtemps fait l'expérience que la plupart des interprètes, qu'ils aient tendance à être flattés par des amis, ou qu'ils ne comprennent pas la chose en jeu, obscurcissent tout par lettres et déforment totalement le sens. De sorte que puisque il s'ensuit nécessairement que ceux qui reçoivent de telles lettres, tandis qu'ils se gorgent de louanges qui plaisent ou de flatteries, ou détournent le sens de ce qui est obscur vers ce qui leur plait, délaissent le véritable sens de celui qui a écrit et est le véritable auteur. »[55]

En lisant une telle diatribe, et comme Roberval fait jouer de nouveaux problèmes sur les centres de gravité ou les volumes de révolution, on a l'impression que la cycloïde n'est plus qu'un prétexte et que se met en place une seconde, sinon troisième phase vers 1643. Cette année-là, Roberval recevait la première lettre de Torricelli, qui manifestait son ignorance des travaux sur de tels centres de gravité pour la cycloïde.

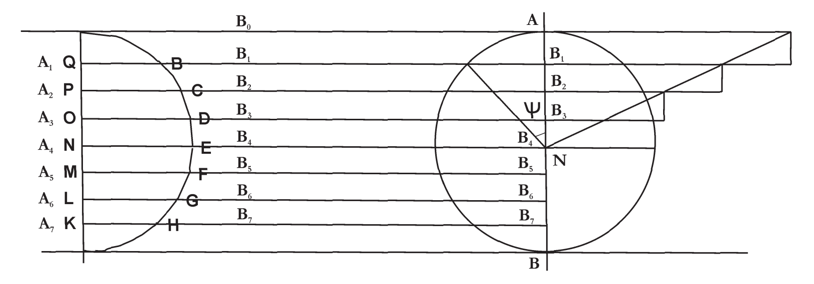
Après avoir cité ce dernier texte d'atmosphère de Roberval, et pour revenir à la cycloïde en son début, et à ce que j'ai qualifié d'analyse, je dois reprendre mon entreprise à partir d'un autre témoignage. Celui de Fermat. Car depuis l'année 1636, éloignés par la géographie à Paris et à Toulouse, Roberval et Fermat échangeaient assez librement et directement des lettres. Nous disposons d'une bonne partie de celles-ci, alors que les correspondances de Roberval et de Mersenne sont bien plus corsetées puisque la localisation commune des deux hommes à Paris fait que la plupart des lettres écrites par Roberval sont rédigées de façon assez formelle, omettant les détails de leur genèse, répondant de fait à une exigence de mise au point de Mersenne, à laquelle la plupart du temps

54. Dans la lettre du 1er Octobre 1643, la première adressée à Roberval, Torricelli s'essaie, par modestie mais surtout par ruse rhétorique, à minimiser ses propres travaux sous le nom de bagatelles (*nugas*).

55. *1646 Déclaration de Roberval 1693.*

Roberval était réticent[56]. En particulier en raison de la possible mauvaise interprétation de son œuvre en chantier (illus. n°10a).

> « J'en demeurai donc là, écrit Fermat dans cette lettre, qu'il me fallait prouver que le demi cercle, duquel le centre est *N* et le diamètre divisé en parties égales *IK*, *KL*, *LM*, *MN*, *NO*, *OP*, *PQ*, *QA*, que la somme des lignes [circulaires] *AB*, *AC*, *AD*, *AE*, *AF*, *AG*, *AH*, *AI*, à l'infini, fait la moitié de la demie circonférence prise autant de fois qu'il y a de lignes *AB*, *AC*, etc., à l'infini. »[57]



Illus. n°10.

À gauche (10a), recomposition de la figure qui se trouve dans la lettre de Fermat à Mersenne du 27 juillet 1638, où il importe de voir que le nombre de points dénommés sur le cercle est impair, avec un milieu en *E*, à l'horizontale du centre *N* du cercle. Fermat joue d'une astuce, pour laquelle la symétrie est majeure. J'ai placé des lettres indexées pour faciliter la lecture des calculs sur les « sommes de Roberval », mais ce dernier en fait n'utilise peut-être pas en l'occurrence les mêmes divisions.

À droite (10b), reconstruction d'une possible preuve par Roberval, avec même utilisation de divisions en verticale, qui joue de la même parité que chez Fermat, mais c'est parce qu'il fait intervenir des cercles à la façon possible d'Archimède, par exemple B_1B_7, B_2B_5. Ainsi Roberval propose un calcul pour lequel les divisions ne sont pas nécessairement égales. Dans tous les cas, on comprend que les rectangles ajoutés, qui correspondent aux sommes de Roberval, donnent l'aire du triangle rectangle, donc l'aire du cercle.

La missive de Fermat explique pourquoi il a d'abord refusé la quadrature qui lui était proposée à propos de la cycloïde, et dont il n'a pas vu la preuve puisque c'est Mersenne qui décrivait un résultat de Roberval, et ne s'engageait en rien sur la méthode. On est interpellé par la présence de la notion de « sommes d'arcs » qui figure dans cette lettre, sans aucune précaution. Ces sommes d'arcs sont-elles une allusion à la « Dimension du cercle » d'Archimède ? Avec peut-être un clin d'œil au texte que Kepler avait donné en 1615, et dont la figure a déjà été fournie au tout début en section 2, avec ce qu'elle suscite

56. On le voit bien par la lettre de Roberval à Mersenne en juillet 1643, mais aussi bien la rigueur de travail exigée par la lettre de Torricelli à Mersenne en 1644.
57. Lettre de Pierre de Fermat à Mersenne du 27 juillet 1638, n° 689, p. 397. Orthographe modernisée.

comme interrogations (illus. n°1). Je commence par la correction que donne Fermat. Mais une semaine après une première lettre, il réagit sur ce qu'il appelle sa « censure trop précipitée », et écrit à nouveau le 27 juillet 1638, comme on le lit dans des manuscrits qui se trouvent à Groningue et à Florence aussi bien. Cette diffusion atteste une certaine circulation[58], et peut-être la constitution de groupes scientifiques un peu structurés pour l'organisation des échanges entre communautés en fonction des compétences des uns et des autres. J'utilise une figure (illus. n°10a et n°10b) refaite dans la *Correspondance de Mersenne* pour pouvoir facilement lire le texte de la lettre de Fermat.

Fermat indique une démonstration astucieuse, en prenant une division en nombre pair et en associant les segments deux à deux, comme *QB* et *KH*, etc. Car il remarque que les longueurs des arcs circulaires *AB* et *BI* ajoutées font la demie circonférence, et *BI* correspond exactement à *AH*. S'il y a donc $2n$ divisions égales sur *AI*, ou encore $2n+1$ points sur le demi-cercle en comptant *A* et *I*, la somme (finie) des arcs à commencer par *AB*, etc., mais en ne comptant pas l'arc *AI*, vaudra $n\pi R$. Addition que Fermat dit comme $2n(\pi R/2)$. Si l'on est surpris par la formulation de Fermat en dernier, c'est bien sûr parce que l'infini sur n intervient, avant même que ne soit faite la division par n. Avec des indices pour éviter de répéter les lettres, on lirait ce qui vient en dernier chez Fermat comme une « somme des lignes », addition des $2n$ arcs $\widehat{AB}_k$, k variant de 1 à n et où B_{2n} coïncide avec *I*, mais le résultat est pour n infini, ou pour nous en passant à la limite :

$$\lim_{n\to\infty}\sum_{k=1}^{2n}\frac{2R}{n}\widehat{AB}_k = \pi R^2$$

On a remarqué qu'il a été nécessaire de multiplier par la même largeur de la division sur le segment vertical *AI*. Fermat ajoute une explication de la démonstration possible, que je livre car on voit bien qu'il raisonne sur les sommes finies, et par inégalités, tout en jouant sur l'ajout ou non de la demi-circonférence, grâce au choix du nombre pair $2n$. Ainsi il fait intervenir l'idée que certaines quantités peuvent être négligeables, à condition de bien les mesurer par l'entier n, et non de faire au jugé comme Kepler :

> « Il s'ensuit donc que les lignes *AB*, *AC*, etc. à l'infini, si vous y comprenez la demie circonférence prise deux fois, seront plus grandes que la demie circonférence prise autant de fois qu'il y aura de lignes ;

58. Lettre de Pierre de Fermat à Mersenne du 27 juillet 1638, n°689, p. 397. Orthographe modernisée.

> et au contraire si vous n'y comprenez pas la demie circonférence, elles seront moindres. D'où l'on peut conclure, en raisonnant à la mode d'Archimède, que toutes les lignes *AB*, *AC* à l'infini, font la moitié de la circonférence prise autant de fois à l'infini qu'il y aura de lignes. »

Ce jeu d'une numérotation paire paraît bien fastidieux, et Fermat ne le présente que parce qu'il craignait qu'un raisonnement direct de Roberval ait été promu sur ces « sommes » sans faire mention de la symétrie pour le cas pair.

Je ne peux pas être sûr que Roberval ait tout de suite pensé à ce que je vais bientôt appeler les « sommes de Roberval », pour lesquelles en fait le pas de la division n'est pas nécessairement constant, et le nombre des divisions n'a pas besoin d'être pair. Il est vraisemblable qu'il a pu interpréter les « sommes de lignes » en les divisant par *n*, selon la méthode même du dessin d'Archimède, avec des cercles successifs à l'intérieur du grand cercle (illus. n°10b), interprétant d'une autre manière pour faire apparaître la somme des arcs à la manière de Fermat. On a en effet une triple lecture que je donne avec présence du nombre entier général *n*, et désignation des angles en jeu. Il faut au préalable quelques notations à partir de l'illus. n°10 : l'angle générique *ANC* dans la figure de gauche, ou *AOQ* dans celle de droite, compte tenu de la division en *2n* parties égales de la droite *AI* est noté pour *k* variant de *1* à $n, \psi_k=\pi(k/2n)$. Évidemment la simultanéité d'une division à pas égal aussi bien pour les angles (les longueurs d'arcs) que pour les longueurs verticales est impossible. Je mets d'abord des notations en lettres indexées, avant de préciser les approximations faites.

On commence par deux sommes, l'une est celle des arcs ψ_k, mais pour des divisions en verticale de pas égal, donc de valeur *2R/2n*, et l'autre est pour les arcs en progression arithmétique, donc pour des angles $\psi_k=\pi(k/2n)$, mais une division de pas variable en verticale. On a donc deux sommes finies :

$$\sum_1=\frac{2R}{2n}\sum_{k=1}^{2n}AB_k;\sum_2=\sum_{k=1}^{2n}R\frac{\pi k}{2n}A_{k=1}A_k$$

Dans les deux cas, on effectue une « approximation » qui consiste à régulariser la division, donc d'une part prendre $\psi_k=\pi(k/2n)$ pour le premier cas, et *2R/2n* pour le second cas en division verticale. On a donc

$$\sum=\frac{2R}{2n}\sum_{k=1}^{2n}AB_k=\sum_{k=1}^{2n}\frac{2R}{2n}R\frac{\pi k}{2n}=\frac{2\pi R^2}{4n^2}\sum_{k=1}^{2n}k=\frac{2\pi R^2}{4n^2}\frac{2n(2n+1)}{2}$$

et à la limite $\sum_1=\pi R^2$. Et de même

$$\sum\nolimits_2 = \sum_{k=1}^{2n} R\frac{\pi k}{2n} A_{k-1}A_k = \sum_{k=1}^{2n} R\frac{\pi k}{2n}\frac{2R}{2n} = \frac{2\pi R^2}{4n^2}\frac{2n(2n+1)}{2}$$

et à la limite $\sum_2 = \pi R^2$.

Dans les deux cas, voilà l'aire du cercle retrouvée au moyen d'une sommation portant sur des entiers. Cela n'a pu que donner à réfléchir, dans la mesure où un calcul, donc une quantification, venait enfin diriger la démarche graphique de Kepler en 1615. Mais dans les deux cas, il y avait une approximation bien moins dirigée que celle de Fermat qui négligeait un terme fini divisé par *n*. Fermat soupçonnait Roberval d'avoir fait une telle approximation, et il le lui reproche. Voyons ce que Roberval en fit.

Il associe à la somme de longueurs d'arcs circulaires un tout autre calcul, porté cette fois par la figure de droite, et qui, moyennant un autre regroupement, s'avère analogue au précédent. Avec également des approximations puisque l'on prend le rayon du cercle supérieur à chaque division (illus. n°9b). Mais l'interprétation avec des aires de couronnes circulaires assimilées à des rectangles, mais aussi des sommes de Riemann en fait, des indivisibles épais que j'ai figurés dans le triangle rectangle, est différente de la technique proposée par Kepler en 1615, mais bien sûr conduisent aussi bien à la valeur de l'aire du cercle.

$$\sum\nolimits_2 = \sum_{k=1}^{2n} R\frac{\pi k}{2n} A_{k-1}A_k = \sum_{k=1}^{2n} R\frac{\pi k}{2n}\frac{2R}{2n} = \frac{2\pi R^2}{4n^2}\frac{2n(2n+1)}{2}$$

soit $\sum = \pi R^2$

L'intervention inattendue de sommes arithmétiques dans tous ces exemples, celles des premiers entiers, force à penser à des extensions avec les sommes de puissances d'entiers. Et c'est ce qui fait passer à l'idée d'une multiplicité de fonctions possibles, celles données par les puissances successives (entières ou non). Roberval en parlera sans souci de faire court dans sa *1646 Déclaration 1693*. Mais il annonce clairement que l'idée de ces généralisations de type fonctionnel — les puissances — fut celle de Fermat avec qui il correspondait.

> « Vers cette époque, c'est-à-dire vers 1635, par l'intermédiaire du sénateur M. de Carcavy, j'ai commencé à avoir une correspondance avec le sénateur toulousain M. de Fermat, sur lequel vous avez une opinion en raison de la lettre que j'ai envoyée au R.P. Mersenne au

> sujet de votre solide hyperbolique[59]. Donc cet homme prestigieux, le premier d'entre tous, nous[60] envoya sans démonstration deux propositions des plus belles. L'une au sujet des paraboles, l'autre de la spirale, toutes les deux avec toutes les différentes puissances. (Tu ne peux plus donc douter que c'est ce premier qui a proposé de telles questions : elles ne sont pas venues de moi quoique j'aie pu les démontrer par notre méthode bien adaptée en l'occurrence). Bien plus et avec plus de généralité que ce que tu proposes. Ainsi il proposa de faire intervenir les puissances dans les spirales, mais aussi les racines de ces puissances. » (*1646 Déclaration de Roberval 1693*).

Deux domaines mathématiques distincts se rejoignent, la recherche arithmétique sur les sommes d'entiers et leurs puissances (même rationnelles et non seulement entières) et la quadrature des courbes. À l'occasion certes de la cycloïde. Mais celle-ci n'est plus l'enjeu, car ce sont les courbes plus généralement qui sont en cause. Selon un calcul qui contraint à faire intervenir les valeurs des ordonnées en un nombre quelconque de points. Ces sommes de Roberval portent donc le concept de fonction numérique en s'y réduisant du point de vue formel, avec le jeu de la variable, qu'elle soit angulaire ou de longueur. De la même façon que le calcul pour une tangente que nous avons précédemment vu aux sections 6, 7 et 8.

Si une théorie est en gestation, on ne perçoit pas laquelle, car on ne peut pas penser que serait en jeu un lien entre tangentes et aires. Mais un calcul se dessine, avec l'idée qu'il y a quelque chose que l'on peut appeler « somme » sous les courbes qui sont susceptibles du traitement fonctionnel. Mais seulement sur celles-ci ! On comprendra pourquoi à la section 11.

Comme souvent lorsqu'on analyse une situation qui a donné lieu à une inutile correction, en l'occurrence celle de Fermat sur laquelle Roberval s'expliqua en allant de l'avant, on oublie l'objet du débat, la cycloïde. Or c'est bien la somme des longueurs d'arches circulaires qu'il faut activer afin justement de trouver l'aire de l'arche, et non l'aire du cercle qui est en jeu. Par le repérage baroque que Fermat utilise, et Roberval à sa suite, la longueur de l'arc *CM* est égale à la longueur *RM* (voir illus. n°7). Donc additionner les longueurs *RM*, c'est aussi bien additionner les longueurs d'arcs. Roberval montre qu'il n'est

59. Il s'agit du célèbre volume engendré par la rotation d'une hyperbole tronquée autour d'une asymptote, l'aire étant infinie pour une section par un plan méridien, mais le volume fini. Voir Mancosu, 1991.

60. Ici « nous » semble se référer aux seuls Mersenne et Roberval, et non à la communauté parisienne autour de Mersenne, voire incluant Fermat.

pas besoin de recourir à la notion d'indivisible au sens initial de Cavalieri, ni de prendre les précautions de Fermat pour les sommes : mais le prix à payer est de savoir quelles approximations sont licites dans le terme général de telles sommes. Si dans ce processus la courbe des sinus verses n'a pas à intervenir, l'intelligence de Roberval est de comprendre qu'il peut quand même l'utiliser grâce à de telles sommes. Nous avançons.

10. Parlons « fonctions » avec « tous les sinus ensemble »

On peut parler d'une quête sur les fonctions numériques possibles en tant qu'objets encore indécis, mais qui deviendront liées à la recherche de calcul intégral que comportent ces sommes, parce que ces fonctions sont celles sur lesquelles on peut calculer explicitement des sommes de Roberval. Que pouvaient être ces fonctions en lice ? On trouve justement chez Roberval, une autre allusion à ces « sommes de lignes ». Et cette fois on n'a pas la quadrature d'une surface entière, comme l'arche, mais le calcul de l'aire d'une portion quelconque. À la façon dont Grégoire de Saint-Vincent avait trouvé l'aire d'une portion d'hyperbole, ou plutôt avait fini par indiquer qu'il s'agissait du logarithme (Dhombres, 1995, 2011, & 2013). La cycloïde n'est-elle donc plus en cause ? Est-ce par hasard qu'elle intervienne encore ? L'enquête doit se poursuivre.

Sans précaution d'enfilades de définitions préalables, je prends d'emblée une des premières propositions de Roberval dans son *Traité des indivisibles* dont nous avons une version publiée dix-huit ans après sa mort, où l'on ne retrouve pas l'illus. n°9 qui a servi précédemment pour la détermination des triangles *robervaliens*, mais où figure la courbe des sinus verses. Une courbe que l'on trouve encore dans le texte *De Trochoide ejusque spatio*, imprimé également en 1693. Y est donnée sans éclat une proposition (la quatrième dans le *Traité* en question) qui est, véritablement, une nouveauté de l'intégrale avec l'aire d'un arc quelconque d'une courbe particulière, en fait un arc de cercle repéré en axes orthogonaux. Un célèbre cas ancien de référence est le traitement d'un arc quelconque de parabole par Archimède, que l'on dit être une quadrature dans la mesure où il y a équivalence avec l'aire d'une figure rectiligne[61]. Ce travail chez Roberval vient juste après le calcul de l'aire de l'arche d'une cycloïde,

61. La quadrature de la parabole d'Archimède a excité tous les esprits du XVIIe siècle, et en particulier Torricelli qui ne proposera pas moins d'une vingtaine de preuves dans son *De dimensione Parabolae* (*Opera Geometrica*, 1644, après la page 243, nouvelle pagination, pp. 1-84).

qui est un arc particulier de cette courbe et non l'arc général. On ne devrait pourtant pas parler de quadrature, puisque la question n'est plus de donner un équivalent figuré rectiligne, comme un carré. Le même passage révolutionnaire de la quadrature à l'intégrale vaut pour le résultat sous l'hyperbole de Grégoire de Saint-Vincent, mais il faut bien sûr ne pas donner cette fois au mot intégrale la valeur d'anti-dérivation qu'à la fois Newton et Leibniz allaient lui procurer de façon magistrale.

L'intégrale en question avec Roberval correspond à un calcul selon ce que nous appelons aujourd'hui d'un terme plus nouveau encore, des sommes de Riemann à pas constants. Elles sont traitées comme des moyens de calcul par un jeu de passage à l'infini qui néglige d'une façon non quantifiée des sommes de quantités considérées comme trop petites pour compter. On les a aussi bien vues chez Fermat que chez Roberval, et sans doute avant l'été 1638. De sorte qu'il n'est pas de bonne description de parler du jeu de figures inscrites et circonscrites à la manière des Anciens, celle que précisément reprenait avec talent Grégoire de Saint-Vincent dans son livre de 1647. Mais comme chez Grégoire de Saint-Vincent, c'est un calcul qui prend la part essentielle, et si le support est une figuration géométrique, les manières de ce calcul sont celles des proportions, sans aucune autre aide algébrique. D'ailleurs le titre donné à ce travail particulier de Roberval est explicite : « Proportion de la circonférence du cercle à son diamètre » (Roberval, 1693a, p. 193).

Evelyn Walker en 1932 dans son travail systématique de traduction et d'interprétation moderne en anglais du *Traité des indivisibles* a fondamentalement raison d'exprimer que le résultat de la proposition 4 correspond à la primitive en cosinus du sinus :

$$\int_{\theta_1}^{\theta_2} \sin \vartheta d\vartheta = \cos \vartheta_2 - \cos \vartheta_1$$

À ceci près que la notation du sinus ou du cosinus n'interviennent pas chez Roberval, pas plus bien sûr que la notation intégrale dont on sait qu'elle est due à Leibniz utilisant en plus la notation *d* qui n'est certainement pas disponible chez Roberval. La variable de sommation, si l'on avait le droit de parler ainsi, serait $R\theta$. Il n'empêche que les fonctions trigonométriques purent prendre une place qu'elles ne quittèrent plus.

En fait, on se trouve dans un des cas d'élaboration de la notion de variable, et sans doute dans une réflexion sur l'originalité de Charles Bovelles ou une meilleure précision que les deux variables de Kepler. Je traduis cette fois le long

titre complet du livre de Walker pour que l'on puisse juger de ses motivations à écrire :

> « Une étude du Traité des indivisibles de Gilles Personne de Roberval, dans l'objectif de répondre, dans la mesure du possible, à deux questions. Quelles propositions de cet ouvrage sont les siennes propres et celles qui sont dues à ses prédécesseurs ou contemporains ? Et quel effet, s'il y en eut, sur le travail de ses successeurs ? »

J'ai suffisamment dit que le présent travail a un autre ressort qu'une affaire de priorité ou même de prévision : je cherche la genèse du concept de fonction numérique d'une variable. Roberval donne une expression dans laquelle joue la notion de « tous les sinus ensemble », et ne donne pas explicitement une proposition, mais un énoncé avec repérage sur la figure, donc saute l'énonciation qui est propre aux manières d'Euclide et qui faisait la règle encore au milieu du XVIIe siècle.

> « Soit le cercle *AIBQ*, son diamètre *AB*, et soient tirés les sinus *CE*, *GV*, *HX*, *IY*, *LZ*, *MK*, *DF*. Que les arcs *CG*, *GH*, *HI*, *IL*, *LM*, *MD* soient égaux ; je dis que la ligne *EF* est à la circonférence *CD*, comme tous les sinus ensemble, savoir *CE*, *GV* et tous les autres, sont à autant de sinus totaux ou demi diamètres. » (Roberval, 1693a, p. 193, orthographe modernisée).

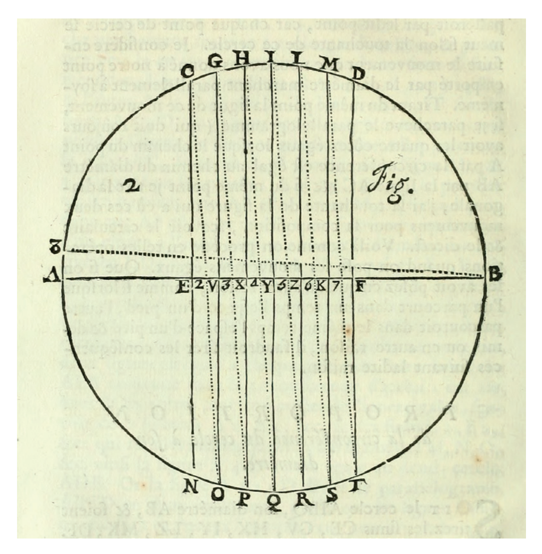
Nous avons déjà envisagé dans le cas des tangentes les expressions pour les deux coordonnées à partir du paramètre angulaire. « Je le montre ainsi » écrit aussitôt Roberval, et c'est bien sûr cette preuve qui fait comprendre ce dont il est vraiment question dans cet énoncé que Walker juge emberlificoté (« *very cumbersome* »). Il me semble que l'on peut convenir d'une notation préalable, non pour « tous les sinus ensemble », qui se ressent de Cavalieri[62], mais pour désigner une somme finie, dans laquelle le nombre d'éléments sommés est indiqué, par exemple par *n*. Roberval parle indirectement de cet *n*, en utilisant l'expression « autant ». Bref on peut convenir d'écrire pour signifier une somme (finie) de sinus, ou « somme partielle de Roberval » (abréviation SR) :

$$SR_K(\vartheta_1, \vartheta_n) = \sum_{k=1}^{n} \frac{1}{n} \sin_R \vartheta_k$$

en appelant le sinus tel qu'entendu à l'époque, soit $sin_R \vartheta = R sin \vartheta$, et numérotant par indexation les angles ϑ depuis 1 à *n*, angles repérant à partir du centre

62. Roberval dispose dans sa bibliothèque de la « Géométrie des continus par les indivisibles ». Voir Dhombres, Pétin, & Poutrel.

K du cercle et de l'horizontale *AB* sur la figure de Roberval ci-dessous (illus. n°11) les points notés *C*, *G*, *H*, *I*, jusqu'au dernier *D*. Peu importe que l'on prenne un angle ou son supplément car on ne traitera ici que de sinus (à la différence de Walker qui a besoin d'un cosinus comme on l'a vu), mais bien sûr les points *E* et *F* seront repérés convenablement pas les valeurs des cosinus du premier et du dernier angle, bien sûr tous situés au-dessus de l'axe orienté AB (angles non tracés sur la figure). Et on peut convenir que pour tout *n*, on prendra $\theta = \vartheta_1$; $\theta = \vartheta_n$. Il. Roberval explicite que les angles sont tels que les arcs circulaires *CG*, *GH*, *HI*, *…MD* sont égaux, et de fait égaux à l'arc de référence *A8*, sachant que le *n* que nous employons est symboliquement égal à 7 dans la figure choisie par Roberval.



Illus. n°11.
Figure intervenant dans le *Traité des indivisibles* chez Roberval.
Source : Recueils de l'Académie royale des sciences, vol. 6, Paris, 1693, p. 254 (https://archive.org/details/diversouvrages00robe).

Pour nous aujourd'hui traiter les SR_n paraît impossible sans le Calcul, et tout autre chose que ce qui a été requis pour les « sommes d'arcs » ayant conduit à la question arithmétique des sommes d'entiers et jusqu'à leurs puissances. Car il faut travailler sur des expressions non pas arithmétiques, mais relevant des sinus, même s'ils sont indexés par des entiers. C'est sur quoi John Wallis allait travailler dans son *Arithmetica infinitorum* de 1656.

Faire apparaître une telle « somme partielle de Roberval » est pourtant chose assez naturelle dans cette géométrie des proportions. Voilà un exemple du rôle d'une théorie des proportions continues : elle a servi Torricelli à l'oc-

casion d'une quadrature de la parabole[63], et aussi bien à Grégoire de Saint-Vincent pour sa définition de la fonction logarithme ou de l'exponentielle. Je tiens à décrire la preuve car elle nous surprend, et les rares commentateurs se contentent de rappeler un lemme de Pappus. Peut-être faudrait-il mieux penser à ces choses envisagées par Viète d'un point de vue algébrique qui lient encore mystérieusement les sinus d'arcs multiples à la propriété de l'exponentielle (complexe).

Il suffit d'utiliser les triangles rectangles semblables successifs *EC2*, *2OV*, *VG3*, etc. (illus. n°11). On donne le nom de 2, 3, etc., jusqu'à 7, aux intersections avec *AB* des lignes dites diagonales par Roberval *CO*, *OG*, etc. Sur cette figure il manque un point pourtant référent, puisqu'il s'agit de la projection de *3* sur *AB*, que j'appelle *0*, et qui nous procure le triangle rectangle de base *E0B*, semblable à tous les autres déjà nommés. Par propriété de la cotangente du même angle, on a évidemment l'égalité du même rapport, ou analogie :

$$\frac{OB}{03} = \frac{EC}{E2} = \frac{OV}{2V} = \frac{VG}{V3} \ldots = \frac{7F}{TF}$$

Et on applique la loi que je qualifie d'addition proportionnelle, et que l'on disait comme *unum ad unum sic omnia ad omnia*, qui consiste à ajouter les numérateurs et les dénominateurs sans changer le rapport, donc à avoir

$$\frac{OB}{03} = \frac{EC + OV + VG + \ldots + TF}{E2 + 2V + V3 + \ldots 7F}$$

Une simplification évidente se voit au dénominateur dès la somme *E2* et *2V* qui donne *EV*, etc., et au numérateur aussi bien, donnant successivement les longueurs *CN*, *OG*, etc. Ce type de réduction dans une longue somme, lisible géométriquement, sera porteur de réflexion pour Leibniz exprimant $1/n(n+1)$ comme différence de $1/n$ et $1/n+1$. Donc en l'occurrence :

$$\frac{OB}{03} = \frac{EC + OG + PH + \ldots + TF}{EF}$$

Revenant au cas générique avec *n* de deux « sommes de Roberval », on obtient effectivement :

63. Voir le zigzag ou ligne mixtiligne de son *De dimensione parabolae*, inclus dans *Opera geometrica* (p. 64, lemme XXIV). Le même zigzag est utilisé dans *Opus geometricum* de Grégoire de Saint-Vincent (p. 92, prop. 70).

$$\frac{OB}{03} = \frac{EC + 2\sum_{k=2}^{n-1} \sin_R \vartheta_k + TF}{EF} = \frac{2nSR_?(\vartheta_1, \vartheta_n) - EC - TF}{EF}$$

C'est ici que surviennent des passages à la limite, En faisant d'abord passer *n* dans l'autre rapport, pour avoir *n03*, puis en faisant *n* infini, *0B* devenant *AB*, et *n03* devenant la longueur de l'arc circulaire allant de *C* à *D.* C'est à condition de négliger les deux longueurs *EC* et *TF* puisqu'elle se trouvent divisées par *n* :

> « Cela n'importe à cause de la division infinie dans laquelle nul fini ne porte préjudice. » (*1646 Déclaration de Roberval 1693*).

Et bien sûr on convient d'appeler « ensemble de tous les sinus » la limite de $SR_n(\vartheta_1, \vartheta_n)$, que l'on peut noter alors $SR(\theta, \theta^1)$ et dire « somme de Roberval » :

$$\frac{AB}{\widehat{C}\widehat{D}} = \frac{2SR(\vartheta, \vartheta')}{EF}$$

Et en divisant par 2 les numérateurs, on a effectivement :

$$\frac{R}{\widehat{C}\widehat{D}} = \frac{SR(\vartheta, \vartheta')}{EF}$$

Comme énoncé par Roberval, *EF* est à la longueur de l'arc circulaire comme la « somme de Roberval » est au rayon ou demi-diamètre. Roberval peut en déduire un cas particulier, celui où *E* est en *A* et *F* au centre du cercle, ce qu'il a noté *K*, de sorte qu'il peut énoncer pour le quart de la circonférence, introduisant une nouvelle terminologie, celle de « tous les sinus divisant la circonférence ». Elle ne correspond pas à ce que nous avons pris comme « somme de Roberval ». Car ici il faut faire intervenir le nombre *n* de la division, ce qu'on lit par le « autant », et l'expression « tous les sinus » ne pouvant valoir que pour la somme partielle de Roberval, multipliée par le nombre de la division.

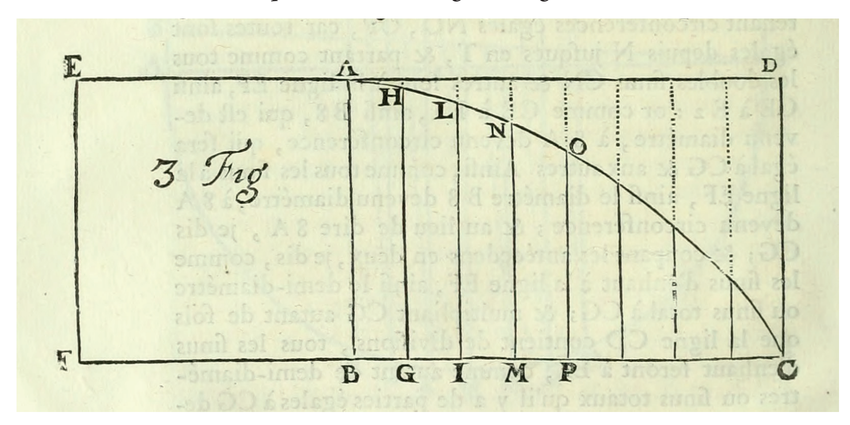
> « Le demi diamètre est au quart de la circonférence comme tous les sinus divisant la circonférence sont à autant de sinus totaux ou demi diamètres. » (Roberval, 1693a, p. 194).

C'est utile pour ce qu'il veut faire pour la proposition qui suit, numérotée 5, mais il est bien dommage qu'il ne commente pas son résultat sur un arc quelconque de cercle, montrant ce jeu d'échange de sinus et de cosinus par intégration. Et surtout ne fasse pas apparaître la variable dans le résultat, donnant

l'aire comme une fonction numérique : la variable disparaît lorsque l'on prend le quart de cercle.

La proposition qui suit est explicitement présentée comme une quadrature, « figure courbe égale à un carré », et pour nous elle ne peut que valoir pour l'intégrale d'une demie sinusoïde. Elle n'est pas générale, portant sur la seule moitié de la période. La figure est simple, sans cercle représenté, et *AB* vaut le rayon et *BC* le quart de la circonférence, tandis que les divisions *BG*, *GI*, *IM*, *MP* et *PC* sont égales, correspondant à des divisions égales pour les arcs sur le cercle non représenté. Roberval énonce :

> « Le carré de *AB* qui est *ABFR* est égal à la figure *ABC*. »



Illus. n°12.

Figure intervenant dans le même *Traité des indivisibles* de Roberval, dans lequel la lecture pré-fonctionnelle est notable. La courbe que l'on voit ici est celle d'un sinus, entre l'angle droit et 0. C'est indéniablement une nouveauté, que Wallis étendra plus tard par périodicité. Le rapport de *AB* à *AC* est à peu près de 1, 5, ce qui est assez correct pour la moitié de π, nettement meilleur que chez Wallis.

Source : *Recueils de l'Académie royale des sciences*, vol. 6, Paris, 1693, p. 256 (https://archive.org/details/diversouvrages00robe).

Cette fois, Roberval introduit une autre terminologie encore, celle des « petits sinus infinis » pour désigner ce que nous avons appelé une « somme de Roberval ». Évidemment l'adjectif « petit » est justifié par le coefficient en *1/n* devant le sinus lui-même, mais nous avons lu comme corollaire énoncé de la proposition 4 qu'il le faisait passer en multiple du rayon. La différence essentielle avec la figure précédente du cercle est, si l'on peut dire, que le cercle justement a été appliqué sur la droite, comme inspiré par le roulement sans glissement de Charles de Bovelles mentionné plus tôt, et que la variable si l'on peut dire de façon anachronique, est cette fois la valeur de l'arc circulaire disposé suivant *BC*.

La démonstration est plutôt laconique. Roberval applique le résultat précédent mais pour un nombre fini de division de la longueur du quart de la circonférence BC (5 selon sa figure). On lit d'abord une approximation

$$\frac{AB}{BC}=\frac{AB+BH+LI+MN+PO}{nAB}$$

qui est brutalement transformée en une autre d'où *n* a disparu, à savoir

$$\frac{AB}{BC}=\frac{aireABC}{aireABCD}$$

que l'on peut comprendre comme un quotient de deux sommes de Roberval, que j'écris d'abord en faisant voir *n*, puis en donnant une notation pour les sommes de Roberval sous deux « courbes » différentes, *SR(ABC)*, ou *SR(AD)*, cette dernière étant la « courbe » horizontale *AD*.

$$\frac{AB}{BC}=\frac{AB(\frac{BC}{n})+GH(\frac{BC}{n})+IL(\frac{BC}{n})+\ldots}{AB(\frac{BC}{n})+AB(\frac{BC}{n})+\ldots}=\frac{SR(ABC)}{SR(AD)}$$

L'interprétation de ces sommes de Roberval pour les aires sous les courbes par les sommes de Riemann à pas constant donne d'un côté le rapport des deux aires, et donc *SR(AD)= AB.BC*. Tandis que le premier rapport quand on le multiplie haut et bas par *AB*, fournit évidemment par comparaison au même produit *AB.BC*, la valeur explicite :

$$Aire(ABC)=AB^2$$

que l'on peut interpréter depuis Leibniz comme donnant la valeur de l'intégrale de la fonction sinus :

$$\int_0^{\frac{\pi}{2}} R\sin\theta Rd\theta = R^2[=\cos\theta]_0^{\frac{\pi}{2}} = R^2$$

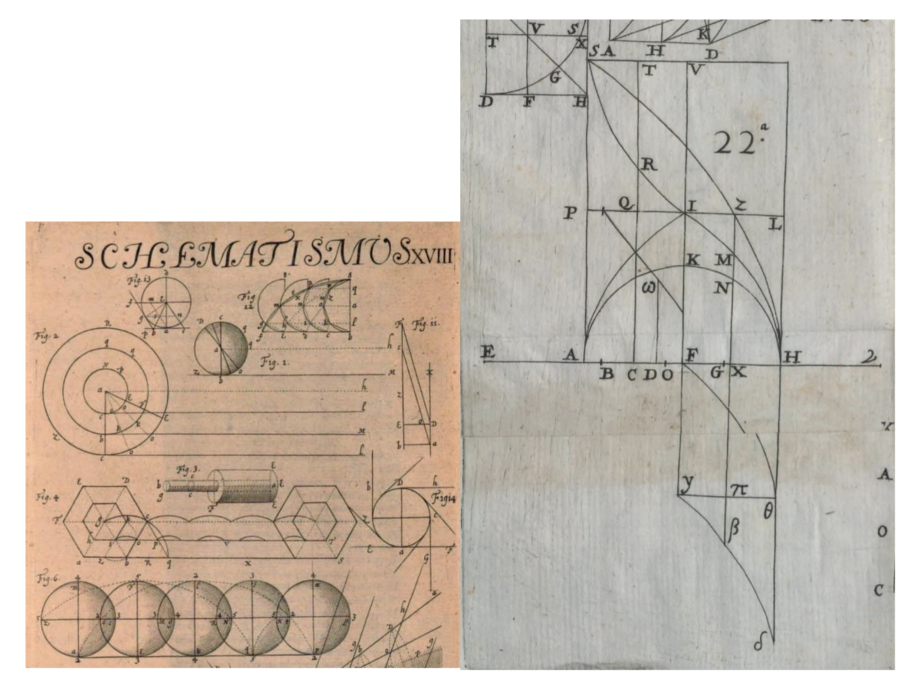
Mais il est impossible de dire que c'est ce qu'a établi Roberval. Il a certes carré la fonction *Rsinus* sur sa demi-période en calculant explicitement par les sommes de Riemann à pas constants. Ce qui fait ressortir le caractère nouveau d'un calcul sur le graphe d'une fonction, ici la fonction sinus. Mais manque ce qui paraît essentiel, l'intégrale comme fonction numérique, et je ne dis même pas qu'il s'agirait d'en calculer la tangente, comme y réussiront Leibniz et Newton.

11. Le handicap tient à un répertoire alors limité de fonctions numériques

À ce point, on serait tenté de dire que la cycloïde n'a plus été qu'un exemple de la quadrature entendue dans le sens nouveau des sommes et le pli analytique sur les fonctions était pris. Il le sera plus encore avec la recherche sur les centres de gravité et les volumes de révolution, pour laquelle d'autres « sommes » interviennent, des carrés de la fonction sinus par exemple, comme on peut s'en douter en envisageant les éléments différentiels intervenant pour une courbe en révolution engendrant un solide. Le carré d'un sinus peut aussi faire penser à la fonction sinus verse. Mais on n'a pas de preuve de ce qui serait pourtant une simple application d'une formule élémentaire. À ceci près qu'il faille comprendre que le passage de la variable angulaire à une valeur moitié n'affecte pas la nature de la fonction, c'est-à-dire lire le sinus verse comme le double du carré du sinus de l'angle moitié.

Ce genre de travail d'approximation, qu'il soit celui du début des années 1643 avec Torricelli et Roberval comme protagonistes majeurs qui se disputent les priorités à ce sujet, ou l'année 1658 qui voit les mêmes disputes avec Pascal et Wallis comme acteurs majeurs cette fois, maintient l'intérêt presque exclusif sur la cycloïde. Même si interviennent sporadiquement d'autres courbes, comme la cissoïde qui sert dans le travail de Wallis en 1659. Je ne crois pas qu'un seul auteur ait fait le lien avec l'invention de l'équation fonctionnelle par Grégoire de Saint-Vincent. Alors que le jésuite mathématicien né à Bruges avait la fonction numérique des aires sous l'hyperbole, dite fonction logarithmique par son élève de Sarasa en 1649. C'est quand même étonnant tant l'offre de fonctions possibles reste limitée avant la venue du Calcul.

Si l'on revient à la cycloïde, c'est qu'elle fait jouer des fonctions trigonométriques comme le sinus que l'on veut apprendre à intégrer, ses puissances aussi bien, à la manière dont Fermat avait procédé pour les simples puissances de ce que l'on peut désormais appeler la variable dans une lecture fonctionnelle des résultats obtenus, et qui avait tant étonné Roberval. Cette sorte de travail justifie donc aux yeux de l'historien la dénomination pour la courbe sinus de « compagne de la cycloïde ». Et les centres de gravité ont le bon goût d'obliger à combiner par produits les puissances de la variable et les sinus. Qui peut dire mieux, si l'on veut obtenir une combinatoire fonctionnelle de type analytique !



Illus. n°13a et 13b.

La planche des figures correspondant en partie à la dissertation de Tacquet sur le mouvement d'un cercle, reprenant la figure de Galilée, et gardant le cercle générateur de la cycloïde en position mobile (planche mise à la fin des *Opera mathematica*). Une figure de la cycloïde, mise dans une planche, dans le travail de Fabri sur la ligne sinus de 1659, repris en 1669.

Source illus. n°13a : A. Tacquet, *Opera mathematica*, après la page 146 (https://books.google.be).

Source illus. n°13b : H. Fabri, *Opusculum geometricum de linea sinuum et cycloide*, 1659, planche (https://archive.org/details/ita-bnc-mag-00000823-001).

Ce n'est pourtant pas ce seul travail de répertoire qu'entreprennent divers auteurs dès la fin des années 1650 : ils essaient de dégager, certes à partir de la cycloïde, ce qui paraît le plus fondamental à leurs yeux, la fonction sinus (ou aussi bien le complément du sinus comme on dit depuis l'établissement des tables numériques, le cosinus). Ainsi, à Rome où il a dû s'installer pour des raisons doctrinales après avoir quitté Lyon, le jésuite Honoré Fabri publie-t-il en 1659 un petit travail portant explicitement sur la « ligne sinus ». Sa définition première est le graphe de cette fonction[64], posant orthogonalement en ordonnées les sinus droits sur une abscisse qui est celle donnant les longueurs

64. Le travail de Fabri en 1659 sur la courbe sinus est reproduit dans un livre paru dix années plus tard à Lyon, et le premier des trois courts et derniers textes est celui sur la ligne des sinus et la cycloïde (p. 313 *et seq*. de ce dernier ouvrage).

des arcs correspondant à des angles. Mais il ne dessine que sur une partie de la période. Sa définition seconde est la cycloïde, aussi bien comme « composition » de sinus et d'arcs selon ce que j'ai appelé le repère baroque, que comme trajectoire d'un point mobile selon deux mouvements « égaux », l'un selon « le cercle, l'autre selon le centre du cercle ». Il ne donne pas de référence à Roberval. Dans cette veine, Wallis présente l'illus. n°5 en 1671, et il fait très attention à bien décrire le graphe de la fonction sinus, sa périodicité, les montées et les descentes, ainsi que les questions de signes pour les valeurs des sinus. Le texte antérieur de Andreas Tacquet, un professeur jésuite, ancien élève de Grégoire de Saint-Vincent, qui prend ses références dans la 24e question d'Aristote et chez Galilée, sans mention aucune de Roberval[65], ne met au contraire pas en évidence le rôle des sinus, et d'ailleurs la courbe sinus verse n'apparaît pas dans les dessins donnés (illus. n°13a).

Il y a un autre manque dans ces travaux des années 1658 à 1670, aussi bien pour les tangentes que pour les aires : l'absence d'une addition des fonctions. Elle n'est certes pas une propriété facile à détecter lorsque l'on se focalise sur les courbes. On pourrait certainement envisager des signes de cette addition chez Cavalieri, mais il s'occupe d'aires et de volumes. On a vu le jeu additif sur les tangentes chez Roberval, ce qui a permis de saisir l'importance de sa découverte (illus. n°9). Mais il n'a rien publié.

On comprend donc l'intérêt porté à des problèmes nouveaux sur les volumes à partir de 1638 comme enrichissant le répertoire.

> « Notre découverte[66] peut également être étendue aux solides, à savoir si toutes les figures citées sont en rotation autour de l'axe *AB* prolongé autant que nécessaire, et les solides prolongés jusqu'aux droites *AD*, *AE*, etc., sont conçus comme des pyramides, d'autre part les espaces solides jusqu'aux parallèles *DM*, *EL*, etc., pour des parallélèpipèdes. Et de cette façon le solide décrit par le triligne *ABC*, et le solide décrit par le triligne *ACN* dans l'exemple pris, sera doublee du solide décrit par le triligne *AVBC*. Et de là sont acquises infiniment d'innombrables espèces de solides finis. »

On pourrait dire de même pour les centres de gravité. Mais à ce point, indique Roberval à Torricelli, il faut tenir compte d'une différence de « génie ». Il y a certes chez Roberval le préjugé que c'est lui qui est le plus profond. Même s'il lui faut rester dans la course en envisageant les centres de gravité.

65. Les ouvrages de Tacquet, listés en bibliographie, sont respectivement de 1651 et de 1669.
66. Roberval la désignera plus loin sous le nom de parallélogrammes.

> « Nous avons écrit et écrirons d'après notre propre génie ! Toi, comme tu fais grand cas des centres [de gravité], parce que tu espères pouvoir en déduire les volumes des solides, tu tendais principalement vers les volumes. Pour cette raison tu as magnifiquement produit leur genèse, et si elle ne doit pas être estimée moins que les autres, c'est que tu l'as jugée ainsi. Moi au contraire, parce que j'ai cherché et trouvé par la voie géométrique les solides sans les centres [de gravité], ceux-ci en provenaient sans surcroît de travail. Pour cette raison, je ne l'ai pas examinée avec les autres, et je n'y ai jamais appliqué mon esprit. D'après votre méthode qui a été mise en avant et que j'avais depuis peu, une surface plane étant donnée, il ne me restait à devoir chercher que les seuls solides. »

On pourrait parler d'un blocage, justement dû à sa réussite avec les sommes de Roberval. Car les astuces de calcul dont il fallait faire preuve pour manipuler ces sommes masquent le fait que de telles astuces ne peuvent pas s'étendre indéfiniment. Ces sommes font nécessairement appel à des fonctions qui ne sont pas répertoriées comme polynômes ou combinaisons trigonométriques. Il y avait moyen de le savoir, à condition de connaître le résultat sur les logarithmes, ou encore celui sur les sommes de sécantes en navigation qui font jouer non seulement les logarithmes, mais aussi les fonctions tangentes obtenues à la fin du XVIe siècle dans le cadre des travaux sur la navigation. Là encore une liaison ne semble pas faite, du moins pas avant l'arrivée du Calcul. Une étape supplémentaire aurait pu consister en la reconnaissance que le procédé fonctionnel des sommes de Roberval, procédé additif quant aux fonctions concernées, se devait d'être ajouté aux techniques analytiques. Sans espoir de tout ramener à des formes déjà connues. La grande découverte, celle de Leibniz et de Newton, est que l'intégration comme fonction à partir de l'aire, sous le graphe même d'une fonction, se ramène fondamentalement au calcul des tangentes indiqué par les *triangles robervaliens*. On ne pressent rien de tel chez Roberval.

L'historiographie a fait des indivisibles auxquels je passe, le moteur de la recherche de Roberval. Ce qui n'est pas acceptable. Il vaut mieux parler en effet d'une évolution de Roberval, à partir de ses propres idées de la théorie de l'infini comme il l'écrit, et qui remet les indivisibles sur une voie analytique. Il se permet de garder le nom puisqu'il avait fait fureur chez tous. Là encore, on constate que les indivisibles, remplacés par les sommes de Roberval, mettent en avant la perception spatiale. Comme pour le cas des tangentes, pour lequel à partir d'une succession continue sur le paramètre angulaire on passe à deux dimensions grâce aux *triangles robervaliens*.

12. Le statut des indivisibles chez Roberval

En 1646 vraisemblablement, Roberval explique sa trajectoire intellectuelle à Torricelli, et peut-être à Mersenne aussi bien qui lit la lettre, en insistant sur les Analytiques, que l'on peut traduire par calcul plutôt que par Algèbre. Il reconnaît que les questions liées à la quadrature du cercle le dépassent. Il en appelle à la postérité d'Archimède, tout comme Kepler que l'on a vu présenter autrement Archimède (illus. n°1), et pose sans fard une théorie de l'infini (*infiniti doctrinam*).

> « Et je dois l'avouer, ayant alors 27 ans, quand bien même par exercice continuel depuis dix années j'avais eu comme activité, sans relâche, d'apprendre, d'enseigner, et de traiter des choses mathématiques[67], et en premier vraiment les Analytiques (*in primis vero Analyticis*) dont je me délecte encore maintenant beaucoup, je n'avais pas réuni, ni n'avais reçu les forces d'esprit (*ingenii vires*) suffisantes qui sont requises pour ce type de questions[68]. Sur ces entrefaites, comme je réfléchissais souvent en moi-même par quelle voie la plus sûre je pouvais mieux pénétrer dans le doux savoir mathématique, je décidais d'examiner attentivement le divin Archimède, presque unique parmi les anciens géomètres. Et par cette méditation j'ai pu m'approprier cette théorie de l'infini que l'on ne louera jamais assez. À cette époque j'appelais ainsi celle que le très illustre Cavalieri nomme la théorie des indivisibles. »[69]

Roberval décrit aussi son état d'esprit quand il se démarque des indivisibles.

> « Notre propre méthode, si elle ne règle pas tout, prend certainement la précaution de ne pas comparer des hétérogènes. En effet, nous considérons de la façon suivante nos infinis ou indivisibles (*infinita nostra seu indivisibilia*). Une ligne vraiment comme si elle consistait en une infinité ou nombre indéfini de lignes, une surface comme si elle consistait en une infinité ou nombre indéfini de surfaces, un solide consistant en solides, un angle consistant en angles, un nombre indéfini consistant en unités indéfinies (*numerum in-*

67. En trois verbes, Roberval décrit ce qui dut être pour beaucoup la scansion dans le temps de l'apprentissage des mathématiques, passant par l'enseignement, celui reçu et celui exercé en même temps. À ce propos, notre contemporain vit la première expérimentation d'une spécialisation en recherche mathématique sans lien avec un enseignement donné.
68. La question est celle qui tient à la quadrature du cercle.
69. En ce début de *1646 Déclaration de Roberval 1693*, Roberval tient à se distinguer des indivisibles *stricto sensu* selon Cavalieri.

> *definitum ex unitatibus indefinitis*)[70]. Bien plus nous considérons un plano-plan[71] comme composé de plano-plans en nombre indéfini, et de même pour les grandeurs d'ordre plus élevé, chacune d'elles ayant son utilité[72]. D'autre part, lorsque nous analysons une espèce en une infinité propre à cette espèce, nous maintenons toujours une certaine égalité, ou une certaine progression, entre les hauteurs ou les largeurs des parties. »[73]

Ceci fait, il explique clairement qu'il considère les indivisibles comme une nouveauté extraordinaire, et méprise ceux qui les refusent parce qu'attachés à des restes du passé (*atque facili relicta*). On interprète aisément ce qu'il dit des indivisibles par les sommes de Roberval, et donc on a un moyen, s'il les pensait bien avant 1638, d'avoir une genèse de sa pensée à partir des équations paramétriques, aussi bien pour le calcul des aires que pour celui des tangentes. C'est ce que je voulais montrer comme possible, et en le faisant j'ai pu faire voir le concept de fonction numérique à l'œuvre.

On pourrait penser que la diatribe sur le respect des homogènes, le passage aux indivisibles déjà qualifiés d'épais pour parler des sommes de Roberval, soit juste de sa part une façon de se démarquer de Torricelli. Ce n'est vrai qu'en partie. Car il sait bien que le calcul de ses sommes contraint à des approximations pour aboutir, alors pourtant qu'il sait le résultat difficilement contestable. Il est probable qu'une autre intervention, celle de Descartes, ait perturbé Roberval, alors que celle de Fermat avait pu l'encourager à chercher de son côté une généralisation vers la fonction sinus.

13. Le rôle de Descartes pour un maintien en jeu de la mécanique

Descartes d'un seul coup, dans une lettre à Mersenne de 1638, donne à voir le centre instantané de rotation dans le mouvement du roulement sans glissement. Ce centre, qui n'est pas ainsi nommé par Descartes, mais deviendra

70. Cette autre précision sur les nombres semble imposer que Roberval envisage des sommes de la nature de celles de Riemann.
71. Il s'agit d'une puissance de degré 4.
72. C'est un trait de Roberval de ne pouvoir s'empêcher de parler de plusieurs choses en même temps, ici de l'importance à ne pas se limiter au seul degré trois, mais de parcourir tous les degrés.
73. Si ma lecture est correcte, Roberval expliquerait qu'il ne considère que des divisions à pas égaux, ou au plus dont le pas suit une progression donnée.

un objet de la cinématique, se trouve justement au point de contact du cercle qui roule avec l'axe du roulement (le point *A'* dans l'illus. n°2 et qui disparaît symboliquement dans la représentation baroque qui détourne l'attention du côté de la géométrie). Il est facile de voir en effet que pour ce point les deux « vitesses » résultant des deux mouvements de Roberval, celle sur le cercle, et celle sur l'axe, se compensent exactement : il est donc de vitesse nulle dans ce mouvement En tout autre point de la cycloïde, la tangente est nécessairement perpendiculaire à la droite qui joint ce point au centre instantané de rotation. Les longues constructions sur la tangente que nous avons lues paraissent d'un coup fastidieuses et sans élégance. Ce que Descartes ne manque pas de suggérer, poussant la remarque en donnant de jolies figures toutes simples[74]. C'est un coup dur pour Roberval ! Il essaie bien de montrer que la construction cartésienne rejoint la sienne, mais fait un mauvais procès de généralité :

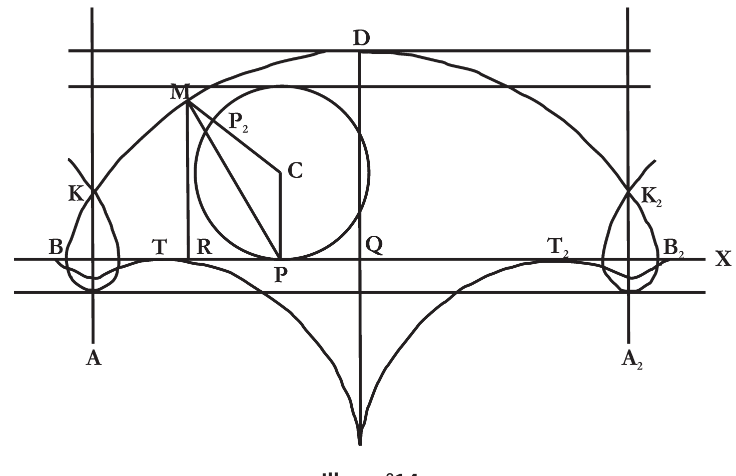
> « Or il est facile de démontrer que cette méthode s'accorde avec la première, mais elle n'est pas si générale, n'étant proposée qu'au cas où la roulette serait du premier genre, c'est-à-dire que sa base *AC* soit égale à la circonférence du cercle, par ce que vous remarquerez dans notre démonstration que nous recherchons analytiquement comme s'ensuit. »[75]

L'indéniable élégance de Descartes, qui n'adopte donc pas le repère baroque, ne prévaut que si on ne s'attache qu'à la cycloïde et qu'on ne tient pas compte de la manière dont Roberval a construit la tangente au point courant de la « compagne de la cycloïde » avec le jeu de *triangles robervaliens*. Autrement dit si on ne perçoit pas l'allant fonctionnel que j'ai tenté de faire vivre tout en le délimitant afin de ne pas en faire un concept terminé.

74. Lettre de Descartes à Mersenne du 23 août 1638, dont le contenu est repris dans l'édition latine de Frans van Schooten de la *Géométrie* de Descartes en 1649, un ouvrage que Roberval possède dans sa bibliothèque.

75. Onzième exemple, de la roulette ou trochoïde de Monsieur de Roberval, dans *Observations sur les mouvements composés…, Divers travaux…*1693, p. 107. En fait, ce que Roberval appelle « analytique » est seulement une démonstration de géométrie à partir de triangles semblables. Descartes donne à Mersenne la construction de la tangente aussi bien pour les cycloïdes allongées que raccourcies, et il est même le premier à exhiber la forme de ces cycloïdes. On n'en voit pas en effet chez Roberval, ni d'ailleurs chez Torricelli. Et la chose ne sera publique qu'en 1649 lorsque van Schooten donnera une version latine de la *Géométrie* de Descartes y ajoutant des lettres de Descartes, et la forme en boucle (illus. n°14). Puisque le texte ici cité est de du Verdus, serait-il vraiment possible qu'il date d'avant 1638 ? Si oui, on ne comprendrait pas cette remarque sur un manque de généralité de la méthode !

Il y a quand même plus chez Roberval que ce mauvais procès fait à Descartes. En ce sens qu'il est très sensible à l'intérêt des cycloïdes généralisées, celles qui ne sont pas le mouvement d'un point fixe sur la circonférence du cercle roulant sans glissement (soit la cycloïde ordinaire, ou du premier genre comme l'écrit Roberval), mais celui d'un point extérieur à cette circonférence, ou encore le mouvement d'un point intérieur à la circonférence du cercle. Car si la construction de la tangente suit bien la méthode de Descartes, elle peut suivre tout autant celle de Roberval, qui tient compte quantitativement de ce glissement. Par contre, comme ces cycloïdes allongées présentent des boucles, le calcul de l'aire sous la courbe n'a guère de sens (ce que montre le dessin moderne ci-après, illus. n°14). Dans notre langage, la cycloïde allongée ne peut pas se représenter par une fonction, mais requiert une paramétrisation, et donc deux fonctions. Roberval, comme Mersenne qui diffuse l'œuvre de Roberval, se garde de présenter des calculs d'aires pour d'autres cycloïdes que pour les cycloïdes raccourcies, qui ne présentent pas de boucles. À la différence de Torricelli qui ne semble pas avoir fait de dessin[76].



Illus. n°14.

Recomposition d'un dessin du XXe siècle d'une cycloïde allongée, où l'on voit les boucles de la courbe. Ces boucles sont pensées par Descartes aussi bien, expliquant même que le point où la courbe retourne sur elle-même est détectable par sa tangente verticale, très bel exemple de l'interprétation du calcul par équations paramétriques des courbes.

Si on recherche d'autres textes qui permettent de préciser la construction graphique, ou les formes de courbes qui conviennent à la situation fonctionnelle, on trouve étonnamment peu. Il existe pourtant un texte de Roberval, bizarre-

76. Voir les commentaires sur la traduction du texte de Torricelli, Jean Dhombres, *Treize textes...*

ment intitulé proposition, alors que rien n'est démontré dans l'énoncé. Il se trouve dans les textes publiés de façon posthume, à propos de la cycloïde que Roberval appelle trochoïde, dont il entend mesurer les aires aussi bien que les volumes engendrés par diverses rotations autour de axes : *De trochoïde ejusque Spatio*. Il s'agit d'un appendice, servant de généralisation à propos d'angles, qui doivent pouvoir dépasser le quadrant, donc de ce que nous prenons pour une extension du domaine de la variable. Étonnamment il est alors indiqué une condition qui revient à dire que la courbe réalise le graphe fonctionnel (un seul point atteint), que l'on prenne les choses à partir des abscisses ou en ordonnées. Et la condition s'énonce par une double règle de monotonie, avec bien sûr une condition de continuité : nous savons depuis Riemann et Darboux qu'il suffit de supposer une seule fois la monotonie et la continuité pour avoir la bijection, donc une fonction inversible. Comme ont été découvertes, dans les bons domaines de définition, les fonctions sinus et arc sinus, etc., avant la fin du XVIIe siècle. Bref, la propriété en jeu (*nec...duobus in punctis occurrere possit*), bien que dite pour la courbe ou ligne représentative, concerne bien mieux le lien entre une variable et une autre.

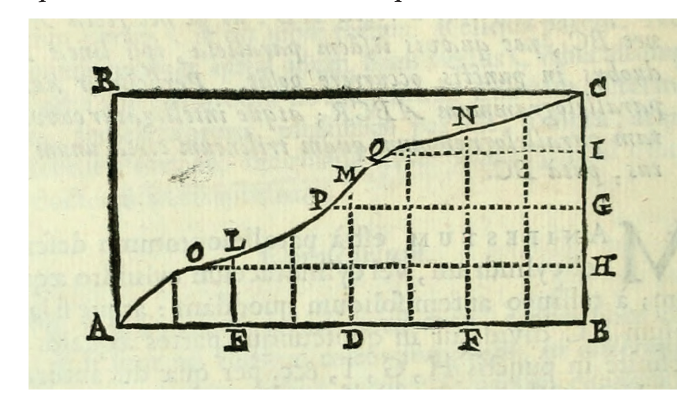
Seconde proposition

> « Soit un tri-ligne quelconque *ABC*, dont deux des côtés, par exemple *AB*, *BC*, soient des lignes droites. De plus que le troisième *AC* soit aussi bien droit que courbe. Mais que ce troisième soit fait de telle sorte qu'en avançant selon celui-ci depuis le point *A* jusqu'au point *C*, que l'on soit continuellement de plus en plus proche de la droite *BC* et également de plus en plus éloigné de la droite *AB*. De sorte qu'ainsi ni la droite *AB*, ni la droite BC et quelque parallèle que ce soit aux deux mêmes droites ne puissent rencontrer la ligne *AC* en deux points. Que soit aussi complété le parallélogramme *ABCR*, et que ce dernier soit tourné, ainsi que le tri-ligne, autour d'un côté, par exemple *BC*. »[77]

Ce qu'en fait alors Roberval est autre, tenant au solide engendré par rotation autour de *BC* par exemple, et à une conception qu'il fait remonter aux indivisibles quoique se défendant parfaitement par sa méthode des divisions en parties égales (illus. n°15). Du coup, on a l'impression que la double considération en abscisse et ordonnée est occasionnelle, dans la seule mesure où il peut vouloir considérer la rotation autour de *AB*.

77. Le texte de cette proposition, accompagné d'une figure, se trouve dans *De trochoïde ejusque Spatio*, un texte publié à l'Académie des sciences en 1693 (pp. 268-269).

Malgré tout c'est l'unicité d'un point atteint à partir d'une variable qui a été mise en jeu. De telles limitations de forme sur des courbes sont anciennes, et par exemple Luca Valerio envisageait en 1604 des fonctions qui sont logarithmiquement convexes, donc des conditions plus fortes et qui relèvent d'un calcul, évidemment proches des questions d'équations fonctionnelles[78]. Ici, on remarque que Roberval s'attache à la seule possibilité de la fonction.



Illus. n°15.

Autour d'un texte un peu surréaliste sur l'incommensurabilité, une figure dans le *De trochoïde* de Roberval qui pose la condition du graphe fonctionnel pour une courbe.

Source : *Recueils de l'Académie royale des sciences*, vol. 6, Paris, 1693, p. 408 (https://archive.org/details/diversouvrages00robe).

Étrangement, un autre mouvement va naître chez Roberval, avec ce que Torricelli appelle les *Robervaliennes*, même si aucune publication *ad hoc* ne viendra du vivant de Roberval.

14. Les *Robervaliennes* utilisent à la fois les tangentes et les aires

Une fois encore je donne la parole à Roberval, dans sa *1646 Déclaration 1693*. Il discute d'une façon générale des aires, sans doute à partir de sa position en 1643, et la cycloïde à proprement parler n'intervient plus :

> « Il reste un point de notre protestation à propos de nos nouvelles lignes quadratrices, que nous avons trouvées il n'y a pas plus de deux ans et que nous vous avons envoyées sans tarder. Je pourrais ici, et raisonnablement d'un meilleur droit, ajouter les mots mêmes que

78. Il est notable que le *De centro gravitatis* de Luca Valerio connaisse une réédition en 1661, après une parution en 1604 et une inscription dans la *Synopsis* de Mersenne en 1644. Voir Napolitano et Saito, 2004.

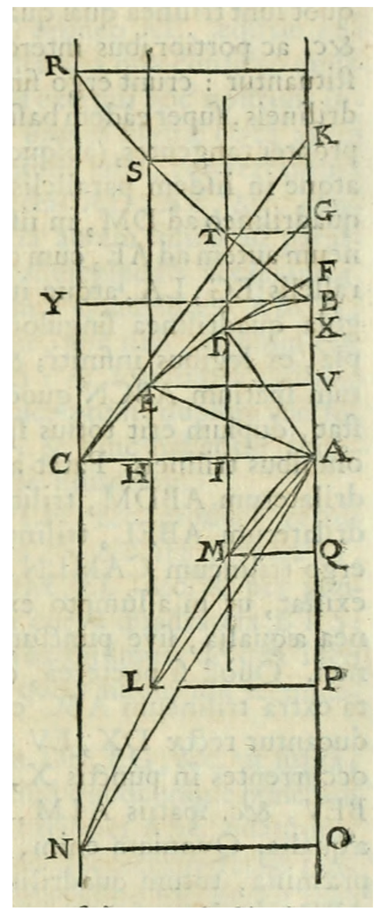
> vous avez ajoutés à propos des centres de gravité : “Il ne faut pas les envoyer”. Ces mots portent en eux une apparence trop acerbe, tout à fait blessante. Au contraire, aurais-je dû les envoyer avec joie pour qu’il vous plaise ? Et si je ne les ai pas envoyés alors, que maintenant je vous les envoie sans faute. Ces lignes, dis-je, à partir desquelles sont produits des espaces plans infinis en longueur, qui pourtant sont égaux à des espaces finis, enclos de partout, vous les avez appelées des *lignes robervaliennes*, du nom de l’inventeur. Moi je les appelle quadratrices d’après leur office et l’objectif de leur invention. Il est en effet la quadrature des figures ; tandis que je ne néglige rien de ce qui semble conduire à cet objectif, en vrai l’expérience est faite (*experior*) de la transmutation (*transmutationem*[79]) des figures elles-mêmes en d’autres figures. Par ce biais (*hac ratione*) je suis tombé sur de telles lignes. »

Explicitement, Roberval parle d’une courbe générale, ce qui signe un adieu à la cycloïde, mais non à l’aide que celle-ci a pu apporter :

> « Soit dans la figure le tri-ligne *ABC* comme il est requis, dont le point *B* est le sommet, la droite *AB* la hauteur, la droite *AC* la base, et que la ligne *BC* soit une courbe quelconque. En effet rien n’empêche qu’elle ne soit quelconque. Pour que nous générions ici quelque chose du genre infini, pour vous comme pour tous, que cette courbe soit concave du même côté ou penche du côté de BC (il faut compléter dans la figure avec la droite *BC*, menée de *B* vers *C*), de manière qu’elle soit entièrement à l’extérieur du triangle *ABC*, ou la même depuis le point *B* jusqu’au point *C*, qu’elle s’éloigne continuellement de la droite *BA* et approche de plus près la droite *CA*, les deux étant estimés, retrait concave ou approche, selon des perpendiculaires menées des droites *BA*, *AC* à la courbe *BC*. Que soient pris sur la courbe *BC* des points quelconques en nombre quelconque, *D*, *E,* etc., desquels sont menés des lignes droites *DF*, *EG*, etc., tangentes à la courbe *BC* en lesdits points *E*, *F*, lesquelles tangentes

79. La transmutation sera le vocabulaire également adopté par Leibniz, qui a eu connaissance des courbes appelées *Robervaliennes*. L’essentiel n’est pas une influence directe et radicale, mais la confirmation que certains types de calcul étaient possibles. J’ai essayé d’arrimer un calcul à la figure de l’illus. n°9, pour établir que quiconque la voit, mais n’a pas vu ou lu le calcul possible de Roberval, ne peut que penser aux règles opératoires élémentaires qui sont celles du calcul différentiel. Sans pourtant aller jusqu’à la règle essentielle du changement de variable. Or cette règle existait, mais sous une forme géométrique peu déchiffrable, due à Fermat et rendue publique en 1660. Elle fut reprise par Newton dans son manuscrit de 1671 sur la méthode des fluxions et des séries, rendue publique d’abord en anglais en 1736, traduite en français par Buffon en 1740. Nous en discuterons rapidement en dernier avec le texte de L’Hôpital.

rencontrent l'axe *AB* prolongé au-delà de *B*, en des points *F*, *G*, etc. Que soit menée également par le point *C* la droite *CK* tangente à la même courbe au point *C* et aussi la tangente *CK*. Qu'elle rencontre en *K* l'axe *AB*, ou soit parallèle à la même droite *AB* et coïncide avec la droite *CR* que nous posons être parallèle à *AB*. Puis des points *D*, *E*, etc., que l'on mène les droites *DI*, *EH*, parallèles à l'axe (*AB*), et rencontrant la base *AC* aux points *I, H*, etc. et par le point *A* toutes les parallèles aux tangentes *DF*, *EG*, etc., et que soient menées autant de parallèles dans l'ordre, ainsi *AM* à *DF*, puis *AL* à *EG*, etc. Que la droite *AM* rencontre la droite *DI* prolongée en *M*, qui donne le point *M* ; que la droite *AL* rencontre la droite *EH* prolongée en *L*, et ainsi de nouveau nous aurons un point *L* et ainsi des autres. De cette façon nous aurons depuis le point *A* une infinité d'autres points disposés continuellement dans l'ordre, *M*, *L*, etc. Par ceux-ci nous faisons passer une ligne continue *AML*, etc. : elle sera notre première quadratrice. »



Illus. n°16.

Source : *Recueils de l'Académie royale des sciences*, vol. 6, Paris, 1693, p. 463 (https://archive.org/details/diversouvrages00robe).

Et Roberval introduit la notion d'asymptote

> « Nous l'appelons première parce qu'elle se trouve la première, et qu'elle a été la première diffusée par nous. D'autre part, les autres en dépendirent, du moins d'une certaine façon. Que si la tangente *CK* rencontre l'axe *AB*, la droite *AN* étant menée parallèle à la même *CK*, et la droite *RC* étant prolongée jusqu'à ce qu'elle rencontre *AM* en *N*, le point *N* appartiendra aussi à la même quadratrice *AMLN*. Mais si *CK* coïncide avec *CR*, c'est-à-dire serait parallèle à *AB*, la ligne *AML* prolongée à l'infini ne rencontre jamais la droite *RC* même prolongée, le point *N* sera infiniment distant du point *C*.
>
> Cette droite *RC* prolongée sera asymptote à *AML*, elle-même prolongée et le point *N* sera infiniment distant du point *C*. En lieu d'un tri-ligne, on aurait pu prendre un bi-ligne, ou un autre espace quelconque. Mais nous ne pouvons, ni ne voulons tout traiter dans une seule lettre, afin que ceux à qui plaira l'invention aient quelque chose qu'ils puissent ajouter par imitation. Donc maintenant en prenant pour exemple le tri-ligne *ABC*, étant posé ce que nous avons dit ci-dessus, un certain quadri-ligne *ABCN* est compris entre les deux courbes *BC*, *AN* et les deux droites *BA, CN*. Que ce quadrilatère soit fini vers *N*, ou qu'il ait une partie infinie, je dis que l'espace *ABCN* est le double du tri-ligne *ABC*. Notre démonstration sera tout à fait générale, pour toutes les courbes et espaces, et elle pourrait être établie selon l'habitude des Anciens (*more Veterum*) au moyen d'une double position (*per duplicem positionem institui*[80]). Quant à nous, nous procéderons au moyen des infinis. »

Nous restons dans un cadre fonctionnel, mais il n'est pas vrai que les *Robervaliennes* manifestent une règle qui puisse être perçue comme l'équivalent d'un changement de variables dans les intégrales. À plus forte raison si l'on se contente de voir dans ces courbes une intégration par parties sans pensée fonctionnelle, un simple échange entre variable et fonction. Leibniz et Newton sauront établir un jeu constructif d'une autre envergure, constat qui n'empêche pourtant pas une influence de Roberval, comme nous allons voir. Mais d'abord il faut faire un bilan.

---

80. Il s'agit du double raisonnement par l'absurde que Grégoire de Saint-Vincent appellera en 1647 la « négociation d'exhaustion », avec considération de figures inscrites et circonscrites, en imitation de ce qu'Archimède fit pour la mesure du cercle.

15. Trois récits qui tous trois font jouer des lignées à partir de Roberval

J'ai introduit dans cette étude au moins cinq néologismes, deux qualifiant les repères, et trois d'après le nom de Roberval, *sommes de Roberval*, *triangles robervaliens*, et *Robervaliennes*, et il y a un dernier : *pré-fonctionnel*. J'en ai d'emblée justifié l'emploi. J'ai dû restreindre le sens du mot « fonction » à celui de « fonction numérique d'une variable réelle », et signalé à quel point ce travail de Roberval sur les sommes et les triangles a permis la fonction *sinus*, sans pourtant aller jusqu'à la fonction inverse, *arcsinus,* qui n'est apparue qu'avec le Calcul. De ces trois inventions seule l'avant dernière, les *Robervaliennes*, attestée puisque dite par Torricelli (*1646 Déclaration de Roberval 1693*), trouve sa place aujourd'hui dans les dictionnaires de courbes. Comme on l'a lu, Roberval lui-même s'était insurgé contre une telle dénomination, qui le flattait néanmoins, estimant qu'il fallait écrire en l'occurrence *quadratrice* en raison même de l'objectif poursuivi. Il n'avait pas tort, mais il fallait bien plus pour faire de la quadrature une intégration, et notamment comprendre le rôle du changement de variable pour l'intégrale. On ne sera pas étonné qu'il n'ait pas lui-même donné des noms à ces différents outils, et si on constate que seules les *sommes de Roberval* font toujours partie de l'Analyse mathématique, c'est sous le nom de sommes de Riemann, voire de Cauchy, et elles ne sont plus à pas constants. Mais on doit bien reconnaître que les cinq outils ont joué un rôle dans la fondation du Calcul, aussi bien pour Leibniz que pour Newton. Ce ne peut être que de façon disparate. Comment le voir ?

En ce qui concerne la qualification des repères, Roberval ne peut être crédité seul de leur usage, même s'il s'en servit dès 1634 comme il est vraisemblable. L'étude ici menée avait pour but de montrer que ces repères ne furent pas *a priori*, mais permettaient d'exploiter la nouveauté des équations paramétriques. On ne pourrait pas en dire de même pour le repère cartésien dans la *Géométrie* parue en 1637. Puisque c'est *a priori* que Descartes fit la démarche du repère (d'ailleurs non nécessairement orthogonal) lié au problème de Pappus. De sorte que l'on saisit mieux comment dans la démarche de Roberval, privilège soit donné au repère orthogonal pour des raisons que l'on peut dire fonctionnelles avant la lettre, et j'ai utilisé le mot pré-fonctionnel. On l'a vu lorsque Roberval représenta la « fonction » sinus verse et en chercha les tangentes. J'ai insisté pour faire voir que les repères utilisés, classique ou baroque, permettent de faire intervenir les deux dimensions du spatial, alors même que l'on traite de longueurs (unidimensionnelles) qui sont des fonctions numériques devenues objets essentiels, mais pourtant non explicitement nommés.

Faut-il directement lier cet intérêt sur les fonctions numériques, majeur aux yeux de l'histoire en général car représentation figurée du quantitatif, à la notion surprenante dénommée par Roberval lui-même « sommes des sinus » ? La difficulté est que cette dernière n'a aucun sens en passant à la limite ; il faut faire intervenir les sommes que j'ai appelées sommes de Roberval, soit diviser les « sommes de lignes » par la variable *n*, et alors seulement on peut passer à la limite. Ni Fermat, ni Roberval ne sont explicites sur l'organisation de ces sommes. Néanmoins, en parlant de sinus, et non de courbe, Roberval travaille l'aspect pré-fonctionnel. Autrement dit, le calcul de l'aire que sous-entend cette méthode par la « somme des sinus » peut avoir été suscité par le choix de regarder « fonctionnellement » les variations du sinus verse que l'illus. n°9 résume.

L'étude des variations du sinus verse, et la mise en place de ce que nous appelons le graphe fonctionnel, a conduit Roberval à prendre conscience qu'il pouvait certes n'avoir à traiter que des variations de longueurs, mais il devait les mettre dans l'espace, les spatialiser en faisant jouer la composition géométrique, et c'est ce qu'il appelle la composition des mouvements que nous lisons comme une addition vectorielle, en oubliant pourtant l'aspect cinématique ou même mécanique. De même, pour le vecteur, son origine mécanique est totalement oubliée en algèbre linéaire. Autrement dit, la variation suivant les deux axes de référence de ce qui est à chaque fois une succession, pour laquelle le temps est la bonne métaphore, est rendue, ou représentée, avec deux dimensions et se synthétise. Le *triangle robervalien* dit cette synthèse dans l'ordre spatial ; elle justifie l'analyse en abscisse et ordonnée, et chaque chose analysée se traite de la même façon. On a la seule notion de fonction numérique, même avec une représentation paramétrique d'une courbe. Il est vrai qu'on ne sait traiter que des exemples, comme les longueurs qui s'écrivent en puissances, ou les sinus et leurs puissances. Le graphe fonctionnel n'est pas une figuration synthétique[81] ; il est la trace d'un calcul réglé qui spécifie une variable et une fonction ; il est bien le résultat de l'analyse des deux équations paramétriques d'une courbe plane. C'est le tracé d'une courbe qui devient celui de deux fonctions : elles sont les deux variables. Alors qu'il n'y a qu'un seul paramètre.

Il est temps que je dise que la limite même de mon étude, basée certes sur des textes ou des lettres, voire des manuscrits inédits, est de ne pouvoir établir une genèse indiscutable. Car l'essentiel de ce qu'a fait Roberval n'est publié qu'en 1693, à une date à laquelle ces choses avaient été revues d'une tout autre

81. Ce serait un excellent cas pour mettre à mal la notion kantienne d'intuition synthétique *a priori*.

façon. Je l'ai dit et souligné en écrivant la référence à son texte entre deux dates : *1646 Déclaration de Roberval 1693*. Il y a deux manières au moins de réagir, qui conduisent à deux narrations différentes. L'intérêt, dans les deux cas, est aussi grand pour l'historien et en permet quand même une troisième.

1) D'une part, on peut dire que la publication en 1693 a surpris les savants, et Wallis lui-même, voire Jacob Bernoulli : ils ont estimé que les choses venaient trop tard pour pouvoir entraîner des enrichissements pour le Calcul, qu'on le prenne dans ses perspectives newtonienne ou leibnizienne. Et ont donc « oublié » Roberval et la piste fonctionnelle. Cela permet pourtant un récit, non seulement sur la place de Roberval, mais plus encore sur la suite du Calcul avant qu'Euler n'imprime la seule voie fonctionnelle en 1748. À cette date on n'est plus du tout limité par le nombre de fonctions disponibles, car même les fonctions trigonométriques sont construites en dehors de la géométrie, et le repère cartésien s'impose pour leur représentation, d'autant mieux que l'on est passé à la variable complexe.

2) D'autre part, autre récit, on peut estimer que le passage que Roberval opéra par une analyse des équations paramétriques, et en particulier son passage aux indivisibles dits épais pour indiquer leur association aux sommes de Roberval, a véritablement lancé la voie du calcul intégral, voie tentée à nouveau par Pascal, Wallis, Wren au moins vers 1658, mais qui ne trouve sa résolution que chez Newton et Leibniz une dizaine, voire une quinzaine d'années plus tard lorsque le lien sera fait avec les fluxions et les différentielles. C'est-à-dire lorsque les deux inventions principales de Roberval auront enfin été liées par des relations réciproques. Alors que ce dernier ne fait que les juxtaposer. Cet autre récit dément le détournement d'intérêt que j'avais évoqué au début, qui a fait passer de la question de la construction de la courbe cycloïde à la recherche de l'aire de son arche. Car cela revient aussi bien à une analyse de la courbe cycloïde.

Le troisième récit qui m'est apparu possible porte antérieurement sur le fonctionnel, et sur la possibilité d'une analyse même des courbes en « fonctions ». D'abord dans la décomposition, et c'est cela qui a permis la courbe du sinus verse et la construction d'une tangente, mais aussi le repérage des aires selon différents repères. C'est sur cette même lancée qu'est venue l'étude analysée des variations des longueurs portées par ces « fonctions » non nommées encore telles, mais que l'on voit de façon spectaculaire chez Wallis en 1670 comme la représentation de la fonction sinus. De ce fait Roberval est entré tout naturellement dans la voie du Calcul, au moins aussi nettement que Wallis qui publiait en 1656 son *Arithmetica infinitorum*.

Je ne réduis pas Roberval en parlant d'un aspect pré-fonctionnel. En ce sens qu'il a pu, sans concevoir qu'il infléchissait son travail, exploiter à partir de ce pré-fonctionnel diverses autres voies, dont celles des *Robervaliennes*. Je n'ai pas à m'engager ici sur la suite effectivement donnée à ces travaux de Roberval, chez Newton comme chez Leibniz. Qu'elles soient venues à la connaissance de chacun des deux auteurs majeurs n'est pas une preuve d'influence directe. Mais qui peut penser que la vue d'une figure telle que celle de l'illus. n°9 puisse laisser indifférent quelqu'un travaillant les courbes par analyse ? En témoigne l'illus. n°17 à venir. Roberval avait explicitement déclaré que les *Analytiques* composaient son domaine préféré, mais aussi qu'il n'y était pas bien préparé lors de ses premiers contacts avec les mathématiques, vers 1628. Il me reste bien une dernière cartouche, si je puis dire, celle de montrer l'équivalent de l'illus. n°9 dans un texte qui est résolument de Calcul. Ce sera ma conclusion technique, avant une conclusion générale.

16. Le pré-fonctionnel à la Roberval trouve sa place avec le Calcul dans un exposé sur la cycloïde dans l'*Analyse des infiniment petits* de l'Hôpital en 1696

Un antécédent historique est ici nécessaire. Un dialogue s'était établi entre Huygens et le jeune Leibniz, alors à Paris au début des années 1670. Vingt ans plus tard, tant pour connaître une façon d'exposer de Leibniz qu'une réaction intelligente, est particulièrement riche la correspondance qui se noue à partir d'une lettre envoyée à Huygens en juillet 1690. Leibniz est à Hanovre, rentré d'un séjour de deux ans en Italie, et reprend le contact après tant d'années auprès d'un savant qui a quitté ses fonctions à l'Académie des sciences à Paris. Avec une nonchalance un peu forcée, Leibniz s'enquiert de savoir si Huygens a pu parcourir ses articles aux *Acta Eruditorum* depuis celui d'octobre 1684 sur ce qu'il appelle son « algorithme », et que nous disons comme le Calcul. Il n'est guère disert, mais donne « *l'equation differentiale* » de la cycloïde, ce qui peut difficilement faire comprendre la genèse des nouveaux calculs mais inaugure un nouveau temps ; Leibniz est pourtant persuadé qu'avec ce seul exemple il trouvera en Huygens une oreille attentive, curieuse même, puisque ce dernier a longuement traité de la cycloïde par des procédés mécaniques et géométriques dans son *Horologium oscillatorium* une première fois en 1658, puis une seconde fois de façon magistrale en 1673 avec une théorie des développées.

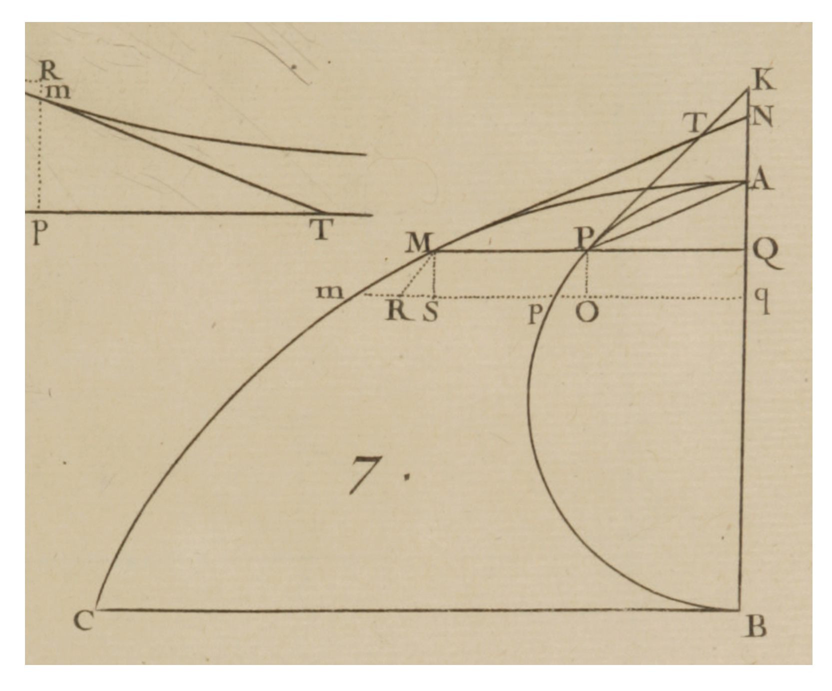
Le résumé que donne Leibniz est extraordinaire par le jeu réciproque de la différentiation et de l'intégration, par le symbolisme, etc. Il passe sans transi-

tion au cas de la cycloïde, donne un dessin où ne figurent que les lettres et tracés dont il aura besoin, mais il tient à dire que son calcul justement évite de trop faire jouer la figure. Et il donne pour la première fois l'équation cartésienne de la cycloïde, ou plutôt d'une demi-cycloïde, c'est-à-dire une relation entre la variable *x* et l'ordonnée *y* qui est celle de la cycloïde, et ainsi offre le point de vue fonctionnel sur cette courbe.

$$\sqrt{2ax - xx} + \overline{\int adx : \sqrt{2ax - xx}} = y$$

Leibniz s'en sert pour obtenir ce que nous appelons la dérivée, et ainsi construire la tangente au point courant de la cycloïde selon l'interprétation du quotient différentiel en tant que pente. Il a une « équation différentielle » ; elle porte explicitement sur cet objet non encore nommé, la fonction numérique.

Six années plus tard, à l'occasion de la rédaction de l'*Analyse des infiniment petits*, premier livre à donner à un public assez général l'évolution des idées sur le Calcul, le marquis de l'Hôpital, quoique ne fournissant pas cette écriture d'une fonction, entre-mêle les idées de Roberval et le calcul des différentielles en vue du même résultat. Je ne montre que la figure utilisée (illus. n°17). Car on voit nettement trois triangles infinitésimaux, deux de sommet *M*, et un de sommet *P*. Visiblement le triangle *MRS* est obtenu par translation horizontale de *Pp0*. De sorte que le triangle rectangle *MmS* donne la tangente à la cycloïde par l'opération d'addition que l'on a vue chez Roberval (illus. n°9). La longueur *mR* n'a par contre pas été obtenue par un triangle déjà connu, elle provient du calcul de la différentiation de la longueur *MP*, égale par définition de la cycloïde dans le repère baroque à la longueur de l'arc *AB*. On a donc bien combinaison sur une même configuration de la considération des *triangles robervaliens* et de l'opération de différentiation qui porte sur des fonctions numériques. Le triangle non rectangle *mMR* est construit par différentiation de la « fonction » *MP*, dépendant de la longueur de l'arc *PA*, longueur conçue comme une variable et notée explicitement *x*. Son côté *mR* est ajouté à *Rs* pour donner le *triangle* (non rectangle) *robervalien msM*. La démonstration ensuite tient à ce que *mR* = *RM*, donc par similitude de triangles, *MP*= *PT*, et assez aisément on déduit le parallélisme de la tangente en *M* à la corde *AP*.



Illus. n°17.

Figure numérotée 7 dans l'*Analyse des infiniment petits*, qui sert à deux démonstrations différentes pour la construction de la tangente *MT* en *M* à la cycloïde, parallèle à la corde *PA* du cercle. Seule la deuxième démonstration fait usage de *triangles robervaliens*, sans pourtant les référer à cet auteur.

Source : G. de L'Hospital, *Analyse des infiniment petits, pour l'intelligence des lignes courbes*, 1716, planche liée à la page 24 (https://archive.org/details/infinimentpetits1716lhos00uoft).

L'Hôpital repère toutes les fonctions à partir du repère orthogonal classique, avec *AB* et une parallèle à *BC* passant par *B*, donc adopte le point de vue de Leibniz, et c'est une représentation de fonction qui allait devenir courante. On peut penser que son ajout d'une seconde démonstration est une sorte d'hommage posthume à Roberval et à son sens pré-fonctionnel, un peu plus de vingt ans après la mort de ce dernier. Hommage intéressé car le recours aux triangles est d'autant plus utile que le calcul effectif de la tangente, son parallélisme à la corde *PA* du cercle, serait pénible si l'on n'utilisait que la représentation fonctionnelle, alors que le triangle vérifié isocèle permet facilement de conclure. Mais ce n'est pas sans doute le plus intéressant dans cette double filiation à Roberval et à Leibniz : L'Hôpital fournit deux démonstrations. Dans la deuxième, il utilise non plus un cercle comme *APB*, mais une courbe quelconque. Et parvient à un calcul qu'il exprime avec des quantités géométriques. Si on explicite leur valeur, on parvient à une formule sensationnelle, avec trois « fonc-

tions » quelconques, *y* comme fonction de *x* qui est fonction de *z*, *y* comme fonction de *x*, et *x* comme fonction de *z* :

$$\frac{dy}{dz} = (\frac{dy}{dx})(\frac{dx}{dz})$$

C'est la formule de dérivation des fonctions composées, dite aussi règle de la chaîne, une des plus importantes pour le Calcul. La cycloïde peut vraiment disparaître : elle a joué son rôle. Il est alors stupéfiant de penser que Fermat a pu jouer un rôle, car c'est de lui que vient le problème traité dans l'*Analyse des infiniment petits*. Il est posé dans ces mêmes termes par Newton vers 1671 dans sa « Méthode des fluxions » non publiée de son vivant, mais là aussi on peut déduire une influence de Fermat, via peut-être Barrow.

Ce n'est pas métaphoriquement que Roberval a su si bien utiliser les équations paramétriques, et comme Descartes donné au calcul une pensée qui permet de juger *a priori* que le jeu en vaut la chandelle. J'ai qualifié ce travail d'analyse, parce que comme chez Descartes avec le problème de Pappus ou la méthode des coefficient indéterminés, la chose à établir, la cycloïde en l'occurrence première, était déjà supposée être là, et même réduite en équations, les deux équations paramétriques qui comportent déjà bien des concepts et des outils, comme celui de roulement sans glissement ou le repère baroque. L'analyse porte sur ces équations, pour apprendre à les réduire à du connu. C'est à l'occasion de cette recherche qui implique des calculs dirigés d'une certaine manière, que d'autres objets mathématiques se font jour. Par deux biais, j'ai essayé de montrer qu'il y eut découverte par Roberval des fonctions numériques d'une variable réelle et de leur représentation graphique. Peut-être sous l'effet de la question de priorité suscitée par Torricelli. Si je pense que cette notion est celle qui sous-tend aussi bien le raisonnement de Leibniz que celui de Newton, mon étude est indépendante de cette autre perspective. Elle n'est pas entachée du soupçon de téléologie du Calcul sous la forme que nous lui connaissons. Le fait de l'y trouver dans les deux cas ne saurait évidemment pas constituer un reproche.

17. Conclusion

Le point est possible sur les ingrédients nécessaires aux récits précédents tous liés à Roberval : il y a la « variation », qui se greffe sur l'idée pré-fonctionnelle d'une dépendance, laquelle est provenue de l'idée de paramétrisation d'une courbe. Il y a l'idée liée à cette indépendance que les « variations » s'ad-

ditionnent à la façon dont les équations elles-mêmes additionnent leurs termes. Enfin il y a association mentale au moins entre le comportement des triangles où figurent des « variations » et les équations paramétriques, qui sont dès lors composées de fonctions. À partir des équations paramétriques encore, sans pour autant abandonner le repère orthogonal et tenant compte du même déplacement horizontal de longueur, et donc des deux courbes, le cercle et le sinus verse, un autre calcul peut survenir en vue d'autres grandeurs. Il aboutira à l'aire de l'arche de la cycloïde comme j'ai pu le montrer. Dans tous les cas les fonctions jouent. Sans pour autant que certaines, le sinus par exemple, apparaisse comme plus utile que d'autres. C'est donc un autre contexte, et le Calcul bien sûr, qui feront apparaître le sinus comme majeur. Roberval le pressent dans son travail où il arrive à intégrer le sinus, comme on l'a vu.

Ayant conclu sur le plan technique des fonctions, je peux suivre Roberval sur le sens même qu'il accorde à l'invention. Il théorise ce que rapporte un travail innovant en mathématiques, notamment le jeu de l'individuel et du groupe, et donc la valeur collective de la science avant même la fondation des Académies des sciences. Il cite Fermat à propos du travail sur l'intégration des puissances de la variable, qui visiblement l'incita à aller vers les sinus.

> « Et comme je lui demandais les démonstrations de propositions alors difficiles, il me répondit par ces mots :
>
> "Moi, dit-il, pour inventer j'ai travaillé ; travaille toi-même, car c'est par ce travail que tu saisiras que réside la principale part de plaisir (*praecipuam voluptatis*)"
>
> Incité par un si grand homme, que faire ? J'ai travaillé, et j'ai eu recours, à l'aide de nos infinis (car je n'avais pas encore appris qu'ils n'étaient pas seulement nôtres), et ainsi pour la première fois je les ai étendus aux nombres. » (*1646 Déclaration de Roberval 1696*)[82].

Qu'aurait dit Roberval du plaisir ressenti s'il avait pu lier son calcul sur les tangentes à celui sur les aires ? L'aurait-il diffusé ? On ne peut s'empêcher de penser à la question analogue chez Newton comme chez Leibniz. Alors que chacun des deux auteurs savait qu'il avait opéré la révolution du Calcul avant 1676, aucun des deux ne décida de publier dans l'immédiat. Existaient pourtant des journaux savants, ce qui n'était pas le cas du temps de Roberval dans les années 1640.

82. L'extension aux nombres ici, est seulement l'intervention des sommes de Roberval et donc ce que nous appelons l'intégration mécanique ou numérique.

Fermat ne s'est lui-même guère préoccupé de donner de la publicité à sa preuve du comportement des tangentes à propos du changement de variable, mais peut-être ne ressentait-il pas l'importance de ce qu'il avait réussi en l'occurrence.

18. Bibliographie thématisée sur la cycloïde

18.1. Œuvres complètes

Descartes, R. (1996). *Œuvres de Descartes* (édit. Adam/Tannery) (nouv. édition). Paris : Vrin.

Divers ouvrages (1693). *Divers ouvrages de mathématiques et de physique par MMrs les savants de l'Académie Royale des Sciences*, *Divers ouvrages de M. de Roberval.* Paris : Imprimerie royale (à partir de la page 65).

Fermat, P. de (1891-1922). *Œuvres de Fermat*, (vol. 1-5) (édit. P. Tannery, C. Henry, C. de Waard). Paris : Gauthier-Villars.

Galilei, G. (1880-1909). Le *Opere di Galileo Galilei* (ed. A. Favaro). Firenze : Barbera.

Huygens, C. (1888-1950). *Œuvres complètes de Christiaan Huygens publiées par la Société hollandaise des sciences*. La Haye : Martinus Nijhoff.

Leibniz, G.W. (2012). *Sämtliche Schriften und Briefe*. Siebente Reihe : *Mathematische Schriften*. Sechster Band : *1673-1676, Arithmetische Kreisquadratur*.

Pascal, B. (1964-1992). *Œuvres complètes de Pascal* (vol. 1-4) (édit. J. Mesnard). Paris : Desclée de Brouwer.

Torricelli, E. (1919-1944). *Opere di Evangelista Torricelli* (édit. G. Loria, G. Vassura) (vol. 1-4). Faenza : Stabilamento Tipo-Litographico Montanari.

Torricelli, E. (1975). *Opere scelte di Evangelista Torricelli* (édit. L. Bellone). Turin : UTET. (traduction italienne de *Opera geometrica*).

Wallis, J. (1696). *Opera mathematica : vol. III.* Oxford : At the Sheldonian theatre.

18.2 Éditions de correspondances

Carteggio (1975). *Le opere dei discepoli di Galileo Galilei.* Vol. 1 : *Carteggio, 1642-1648* (édit. P. Galluzzi, M. Torini). Florence : Giunti Barbera.

Correspondance Mersenne (1932-1988). *Correspondance du P. Marin Mersenne, religieux minime* (vol. 1-18) (publiée et annotée par C. de Waard, puis avec la collaboration de B. Rochot, et enfin sous la responsabilité d'A. Beaulieu). Éditions du CNRS.

Gabbey, A. (AAAA). *Gilles Personne de Roberval (1602-1675), un savant révélé par ses archives. Catalogue des manuscrits et des documents. Documents inédits*. Texte déposé aux Archives de l'Académie des sciences.

18.3 Références à des correspondances dans un ordre chronologique

Lettre de Roberval à Mersenne, 6 (ou 16 Janvier) 1637, n°580, *Correspondance Mersenne*, tome 6, pp. 167-177. Cette lettre a été copiée van Schooten (Library of the University of Groningen, Mss 120, fol. 13v-15v), ce qui peut expliquer pourquoi il l'utilisa pour la première édition latine de la *Géométrie* de Descartes en 1649, et elle est aussi disponible dans les papiers de Viviani (Mss Galileianai, vol. III, 99v-103v). Ce qui justifie Torricelli de parler de la construction de la tangente à la cycloïde obtenue par l'intermédiaire de Viviani, mais il ne précise pas la voie suivie. Cette lettre a fait l'objet d'un article pionnier de C. de Waard : Une lettre inédite de Roberval du 6 janvier 1637, contenant le premier énoncé de la cycloïde. *Bulletin des sciences mathématiques*, 2e série, t. 45, 1921, pp. 206-216 et pp. 220-230.

Lettre de Roberval à Fermat, 1 Juin 1638, *Correspondance Mersenne*, n°675, tome 7, pp. 240-250. Elle se trouve dans *Varia Opera* (p. 154-155) et bien sûr dans les *Œuvres de Fermat*.

Lettre de Fermat à Mersenne, 27 Juillet 1638, n°689, *Correspondance Mersenne*, tome 7, pp. 397-403.

Lettre de Fermat à Mersenne, 5 Août 1638, *Correspondance Mersenne*, n°692, tome 8, pp. 4-6. Le repère baroque y est utilisé.

Lettre de Descartes à Mersenne, 23 Août 1638, *Correspondance Mersenne*, n° 696, tome 8, pp. 34-69 ; *Œuvres de Descartes*, tome 2, p. 307 *et seq*.

Lettre de Descartes à Mersenne, 29 Janvier 1640, *Correspondance Mersenne*, n° 821, tome 9, p. 88; *Œuvres de Descartes*, t. 3, p. 4.

Lettre de Bonaventura Cavalieri (à Bologne) à Galileo Galilei (à Arcetri), 14 février 1640, citée par Carlo Dati, et reproduite dans *Le Opere di Galileo*, tome 18, pp. 153-154 ; *Correspondance Mersenne*, tome 9, pp. 115-118.

Lettre de Roberval à Fermat, 6 Août 1640, *Correspondance Mersenne*, tome 10, pp. 273 *et seq.* ; *Œuvres de Fermat*, tome 2 (1894), pp. 200-201.

Lettre de Fermat à Mersenne, Février/Mars 1642, *Correspondance Mersenne*, tome 11, pp. 65-60.

Lettre de Roberval à Mersenne, tous les deux à Paris, en Juillet 1643, *Correspondance Mersenne*, tome 12, pp. 252-267, avec des notes en marge de Torricelli sur un manuscrit copié sans doute par Viviani (*Carteggio*, t. 32, fol. 15-20,) et *Divers ouvrages,* 1693, p. 278-282.

Lettre de Torricelli à Roberval, 1er Octobre 1643. Reproduite dans *Correspondance Mersenne*, tome 12, pp. 328-333. Elle se trouve encore dans *Divers ouvrages*, pp. 283-284. Cette lettre en latin a été traduite en français par Jean Itard dans son article de 1975. Elle est aussi dans *Opere di E. Torricelli*, 1919, tome 3, pp. 148-149.

Lettre de François du Verdus à Torricelli, 21 Mai 1644, *Correspondance Mersenne*, n°1274, tome 13, pp. 139-142 ; *Opere di Torricelli*, tome 3, pp. 181-183.

Lettre de François du Verdus à Torricelli, 3 Juin 1644, *Opere di Torricelli,* tome 3, p. 184.

Lettre de François du Verdus à Torricelli, 2 Juillet 1644, *Opere di Torricelli*, tome 3, p. 208.

Lettre de Torricelli à Mersenne, fin Juillet 1644, *Correspondance Mersenne,* n°1287, tome 13, pp. 184-186.

Lettre de Torricelli à Maggiotti, fin Juillet 1644, *Correspondance Mersenne,* n°1288, tome 13, pp. 187-189.

Lettre de Roberval à Torricelli, I Janvier 1646, reçue par Torricelli avant le 17 Mars 1646, *Opere di E. Torricelli*, tome 3, pp. 349-356 ; *Correspondance Mersenne*, n°1415, tome 14, pp. 1-25. (Plusieurs manuscrits disponibles dont Ms BNF f. latin nouv. acq. 2341, fol. 1 recto-2 verso = f. latin 11196, fol. 1r-9v + fig 7 et folio 9). Cette lettre de Roberval, qui serait de novembre 1645, est une réponse tardive à la lettre du 1er Octobre 1643.

Lettre de Torricelli à Ricci, 1 mars 1646, *Correspondance Mersenne*, tome 14, pp. 147-148 ; *Carteggio* (1642-1648), pp. 278-279.

Lettre de Le Tenneur à Mersenne, *Correspondance Mersenne*, tome 15, p. 289.

Lettre de Torricelli à Roberval, 7 Juillet 1646, *Correspondance Mersenne*, tome 14, pp. 341-362. (Ms BNF fonds lat. 11 196, mais il y en a d'autres, nouv. acq. 2338, ff 12r-19v). Cette lettre plutôt vindicative est une réponse à la lettre précédente. Le même jour, Torricelli envoie deux lettres à Mersenne, dont l'une assez formelle.

Deux lettres de Torricelli à Mersenne, 7 Juillet 1646, *Correspondance Mersenne*, n°1486, tome 14, pp. 363-371 et pp. 372-376.

Par souci de rigueur, la longue lettre de Roberval, parce qu'elle n'a peut-être pas été envoyée, n'est pas placée dans cette rubrique, mais est mise à son nom.

18.4. Références primaires

Barrow, I. (1670). *Lectiones geometricae, in quibus praesertim generalia curvarum linearum symptomata declarantur*. Londres, J. Dunmore, 1670, 147 p.-12 f. de pl., fig., in-4.

Bernoulli, Jacob (1993). *Oratio de Historia Cycloidis*, Ms UB Basel, L1a 749 A. 3 (8 fol.), publiée en 1927 par Friedrich Weiss, et reproduite dans : *Die Werke von Jakob Bernoulli*, Bd 4, Birkhäuser, 1993, pp. 257-266.

Bernoulli, Johann (1742), *Opera Omnia* (vol. 1-3). Lausanne et Genève.

Bovelles, Ch. de (1547). *Géométrie practique, composée par... Charles de Bouelles, et nouvellement par luy reveue, augmentée et grandement enrichie*. Paris : impr. de Regnaud Chaudière et Claude son fils, in-4°, 70 ff., fig.

Cavalieri, B. (1635). *Geometria indivisibilibus continuorum nova quadam ratione promota...*, Bologne, Clemente Ferroni, in-4°.

Dati, C. (1663). *Lettera a' Filaleti di Timauro Antiate della vera storia della Cicloide...*, Firenze, 1663 ; aussi dans *Opere di Evangelista Torricelli,* vol. I, parte II, 1919, pp. 441-482.

Desargues, G. (1640). *Brouillon Project d'exemple d'une maniere universelle touchant la practique du traict à preuves pour la coupe des pierres en architecture*, 1640, 4 p. et 5 pl.

Fabri, H. (1659). *Opusculum geometricum de linea sinuum et cycloide. Auctore Antimo Farbio* (c.-à-d. Honoré Fabri). Rome : Héritiers de Francesco Corbelletti, in-4°.

Fabri, H. (1669). *Synopsis geometrica cui assessere tria opuscula, nimirum De linea sinuum et cycloide, de maximis et de minimis, et synopsis Trigonometriæ planae (Auctore Honorato Fabri Societatis Iesu),* Lyon : Antoine Molin, in-4°.

Gröning, J. (1701). *Historia cycloidis. Qua Genesis et proprietates Lineae Cyloeidalis praecipuae, secundum Ejus Infantiam, Adolescentiam & Juventutem, Ordine chronologico recensentur, ..., nec non an primus ejusdem inventor, Galileaeus et Demonstrator Torricelli fuerit, contra Pascalium... Accedunt Christiani Hugenii Annotata posthuma in Isaaci Newtoniani...* Hamburg : Gottfried Liebezeith, 1701 (128 p. + 2 p. math. figures).

Huygens, C. (1934). *Œuvres de Huygens. Tome 18 : L'horloge à pendule et à balancier de 1666 à 1695.*

Kepler, J. (1615). *Nova stereometria doliorum vinariorum, in primis Austriaci, figuræ omnium aptissimæ ; et usus in eo virgæ cubicæ compendiosissimus & plane singularis. Accessit stereometriæ Archimedeæ supplementum...*, Linz, Imprimé par Johann Planck aux frais de l'Auteur, in-fol.

Leibniz, G.W. (1686). De geometria recondita et analysi indivisibilium atque infinitorum, *Acta Eruditorum,* juin 1686, pp. 226-233; Gerhardt, Math. Schrift. Vol. 5, pp. 226-234. Traduction française, Parmentier, Marc, *La naissance du calcul différentiel*, Mathesis, Paris, Vrin, pp. 126-144.

L'Hôpital, G. de (1696). *Analyse des infiniment petits pour l'intelligence des lignes courtes*. A Paris, de l'imprimerie Royale, MDCXCVI, in-4°, Portrait de l'Hôpital + (18) + 181 + (3) pages + 11 planches réparties dans le volume.

Mersenne, M. (1624). *L'impiété des déistes, athées et libertins de ce temps, combattue et renversée de point en point par raisons tirées de la philosophie et de la théologie, ensemble la réfutation du « Poème des déistes »*. Paris : P. Bilaine.

Mersenne, M. (1636). *Harmonie universelle, contenant la théorie et la pratique de la musique, où il est traité de la Nature des Sons , & des Mouvemens, des Consonances, des Dissonances, des Genres, des Modes, de la Composition, de la voix, des Chants, & de toutes sortes d'Instruments Harmoniques*. Paris : Sébastien Cramoisy.

Mersenne, M. (1637a&b). *Harmonie universelle*, second volume, *Nouvelles observations mathématiques et physiques*, Paris, Pierre Ballard, 1637, pp. 24-25. La nouvelle pagination commence après le livre 6, lequel s'arrête après la page 408. Il est fort possible que l'addition (un vingtième livre disait Mersenne) ne soit sortie qu'au début de l'année 1638. Le texte des « Observations physiques et mathématiques » qui vient à la fin de ce volume, et est paginé séparément, sera référé selon Mersenne, 1637b.

Mersenne, M. (1639). *Les Nouvelles pensées de Galilei, mathématicien et ingenieur du Duc de Florence...* (trad. de l'italien et adapté par M. Mersenne). Paris : Pierre Rocolet.

Mersenne, M. (1644). *Universae Geometriae mixtaeque mathematicae Synopsis...* Paris : Antoine Bertier.

Mersenne, M. (1647). *Novarum observationum physico-mathematicarum tomus tertius...* Paris : Antoine Bertier, p. 71. (corrige la mention précédente de l'œuvre de Roberval).

Montucla, E. (1758). *Histoire des mathématiques* (2 tomes). Paris : C.-A. Jombert.

Montucla, E., *et alii* (1799-1802). *Histoire des mathématiques*. Paris : Agasse.

Newton, I. (1960). *Mathematical Papers. Vol. 3* (edit. D.T. Whiteside). Cambridge : At the University Press.

Roberval, Gilles Personne de (1636). *Traité de mechanique des poids soustenus par des puissances sur les plans inclinez*. Paris.

Roberval, Gilles Personne de (1693a). *Traité des indivisibles,* in *Divers ouvrages de mathématiques et de physique par MMrs les savants de l'Académie Royale des Sciences*, Imprimerie royale, Paris, pp. 190-245. Une traduction anglaise libre, c'est-à-dire utilisant une reconstruction avec le vocabulaire mathématique moderne, a été publiée dans Walker, 1932.

Roberval, Gilles Personne de (1693b). *De trochoïde ejusque spatio*. Dans *Divers ouvrages de mathématiques et de physique par MMrs les savants de l'Académie Royale des Sciences* (pp. 246-278). Paris : Imprimerie royale.

Roberval, Gilles Personne de (1693c). *Observation sur la composition des mouvemens, et sur le moyen de trouver les touchantes des ligne courbes*. Dans *Divers ouvrages de mathématiques et de physique par MMrs les savants de l'Académie Royale des Sciences* (pp. 69-111). Paris : Imprimerie royale.

Roberval, Gilles Personne de (1693d). *1646 Declaration de Roberval 1696*. Lettre de Roberval à Torricelli. Dans *Divers ouvrages de mathématiques et de physique par MMrs les savants de l'Académie Royale des Sciences* (pp. 284-302). Paris : Imprimerie royale (Ms f latin, nouv. acqu., 2338, fol. 28 recto-fol. 39 verso) ; ou *Opere di Torricelli*, tome 3, 1919, p. 487 *et seq*. Se trouve aussi dans *Correspondance Mersenne*, tome 15, pp. 602-638. Non datée cette belle lettre polémique, rédigée sous la même forme d'expression que la dernière lettre de Torricelli (7 Juillet 1646) ne lui fut certainement pas envoyée (il mourut en Octobre 1647), et Dati ne l'a pas trouvée dans les collections de Florence. Elle peut avoir été écrite en juin 1646, lue à un certain état de composition par Mersenne. On la trouve traduite en français avec des notes dans J. Dhombres, *Textes sur la roulette...*, à paraître.

Roberval, Gilles Personne de (AAAA). Explication de la roulette in *Traité des indivisibles,* qui fournit la construction du sinus verse et du sinus droit, Paris, BNF, f. fr., Nouvelles acquisitions, 5162, fol. 58v.

Tacquet, A. (1651). *Cylindricorum et Annularium libri IV, item De Circulorum volutionibus per planum, dissertatio physico-mathematica*. Anvers : Jacob van Meurs, in-4°.

Tacquet, A. (1669). *Opera Mathematica R.P. Andreæ Tacquet* [...] *demonstrata et propugnata a Simone Laurentio Veterani, ex comitibus Montis Calvi, in collegio Societatis Iesu Lovanii anno MDCLVIII. mense novemb*, Richard Collin (grav.), Simone Lorenzo Veterani (déd., éd. sc.), 2 vol., Anvers, Jacob van Meurs, in-fol.

Torricelli, E. (1643). Racconto d'alcuni problemi proposti et passati scambievolmente tra gli matematici di Francia et il Torricelli nel Quattro anni prossimamente passati (vers mai-juin 1643) ; cela correspond au contenu de la lettre du 1er Octobre 1646 ; *Opere di Torricelli*, tome 3, 1919, pp. 7-16 ; *Opere scelte di Evangelista Torricelli*, Bellone L. (éd.), UTET, Turin, 1975, vol. 3, pp. 7-32.

Torricelli, E. (1644a). *Opera Geometrica Evangelistæ Torricellii. De Sphæra et Solidis Sphæralibus (libri duo in quibus Archimedis Doctrina de Sphæra et cylindro denuo componitur, latiùs promovetur. et in omni specie solidorum, quæ vel circa, vel intra Sphæram, ex conuersione poligonorum regularium gigni possint, universaliùs Propagatur. De Motu Gravium (naturalitur descendentium, et Proiectorum libri duo...). De Dimensione Parabolæ (solidisque hyperbolici problemata duo...). Cum appendice de dimensione spatij Cycloidalis, & Cochleæ*. Florence : Amador Massi et Lorenzo Landi, in-4°.

Torricelli, E. (1644b). De cycloide, in *Opera geometrica*, 1644, p. 85-92, la pagination commence avec le *De Dimensione parabolæ...*; *Opere*, tome I, 1re partie, 1919, pp. 163-172; trad. italienne, 1975.

Wallis, J. (1659). *Tractatus duo. Prior, De Cycloide et corporibus inde genitis. Posterior, epistolaris; in qua agitur, De Cissoide, et corporibus inde genitis: et...*, Oxford, Lichtfeld, 1659. Reproduit dans John Wallis, *Opera mathematica*, Oxford, 1695, pp. 499-547, mais je n'ai pas vérifié s'il n'y avait pas eu des modifications d'un texte à l'autre. La preuve par Christopher Wren de la rectification de la cycloïde s'y trouve.

Wallis, J. (1670-1671). *Mechanica sive, de Motu, Tractatus Geometricus...*, William Faithorne (portrait gravé de Wallis), 2 vol. Londres : William Godbid (imp.) et Moses Pitt (éd.), in-4°.

18.5. Références secondaires

Alexander, A. (2014). *Infinitesimal : How a Dangerous Mathematical Theory Shaped the Modern World*. New York : Scientific American/ Farrar, Straus and Giroux.

Bachelard, G. (1965). *La formation de l'esprit scientifique : contribution à une psychanalyse de la connaissance objective* (4e édit.). Paris : Vrin.

Bourbaki, N. (1974). *Éléments d'histoire des mathématiques*. Paris : Hermann.

Boyer, C.B. (1956). *History of Analytic Geometry*. New York : Scripta mathematica.

Boyer, C.B. (1970). The History of the Calculus. *The Two-Year College Mathematics Journal*, 1(1), pp. 60-86.

Canguilhem, G. (1977). *Idéologie et rationalité dans l'histoire des sciences*. Paris : Vrin.
Cantor, M. (1880-1908). *Vorlesungen über Geschichte der Mathematik* (vol. 1-4). Leipzig : B.G. Teubner.
Dhombres, J. (1995). L'innovation comme produit captif de la tradition : l'exemple de la théorie des proportions jusqu'à la quadrature de l'hyperbole. Dans M. Panza, & S. Roero, (ed.), *Geometria, flussioni, differenziale, Osservazioni nella matematica del'600* (pp. 7-100). Napoli : La Citta del Sole.
Dhombres, J. (2000). La question du repère chez Descartes et dans la postérité cartésienne : essai sur le concept de banalisation en histoire des sciences. Dans P. Radelet-de Grave, & J.F. Stoffel (édit.). *Les « enfants naturels » de Descartes : actes du colloque commémoratif du quatrième centenaire de la naissance de René Descartes* (pp. 27-77). Turnhout : Brepols.
Dhombres, J. (2011). Le jet d'eau et l'arc-en-ciel à l'âge baroque : réalisation des mathématiques, mathématisation de la philosophie naturelle et représentation des phénomènes. Dans F. Cousinié, & C. Nau (dir.) *L'artiste et le philosophe : l'histoire de l'art à l'épreuve de la philosophie au XVII*e *siècle* (pp.151-196). Rennes : PUR.
Dhombres, J. (2013). La mathématisation des météores aqueux d'après le dispositif cartésien de l'arc-en-ciel. Dans T. Belleguic, & A. Vasak, *Ordre et désordre du monde. Enquête sur les météores de la Renaissance à l'âge moderne* (pp. 177-226). Paris : Hermann.
Kline, M. (1972). *Mathematical Thought From Ancient to Modern Times*. Oxford University Press.
Loria, G. (1950). *Storia delle matematiche dall'alba della civiltà al tramonto del secolo XIX*. Milan : U. Hoepli.
Mannheim, A. (1894). *Principes et développements de géométrie cinématique...* Paris : Gauthier-Villars.
Walker, E. (1932). *A study of the « Traité des indivisibles », of Gilles Personne de Roberval*. New York : Teachers College.

18.6. Références secondaires sur la cycloïde en liaison avec Roberval

Agostini, R. (1950). Il metodo delle tangenti fondato sopra la dottrina dei moti nelle opere di Torricelli. *Periodo di Matematiche*, 4/28, 131-158.
Auger, L. (1962). *Gilles Personne de Roberval*. Paris : Blanchard.
Bascelli, T. (2015). Torricelli's indivisibles. Dans V. Jullien (édit.), *Seventeenth Century Indivisibles Revisited* (pp. 105-136). Birkhäuser.
Bos, H.J.M. (2001). *Redefining Geometrical Exactness*. Springer.
Clero, J.P., & Le Rest, E. (1980). La naissance du calcul infinitésimal au XVIIe siècle. *Cahiers d'histoire et de philosophie des sciences*, 16, 194 p.
Costabel, P. (1962). Le « De cycloïde » de R. Boscovich. *Revue d'histoire des sciences et de ses applications*, 15(1), 31-42.

Costabel, P. (1964). Essais sur les secrets des Traités de la Roulette. Dans *L'œuvre scientifique de Pascal* (pp. 169-206). Paris : Presses Universitaires de France.

Costabel, P., & Taton, R., *et al.* (1964). *L'œuvre scientifique de Pascal*. Paris : Presses Universitaires de France.

Dear, P.R. (1988). *Mersenne and the Learning of the Schools*. Ithaca : Cornell University Press.

Dhombres, J. (1986). Quelques aspects de l'histoire des équations fonctionnelles liés à l'évolution du concept de fonction, *Archive for History of Exact sciences*, 36(2), 91-181.

Dhombres, J. (1994). La culture mathématique au temps de la formation de Desargues : le monde des coniques. Dans J. Dhombres, & J. Sakarovitch (édit.), *Desargues en son temps* (pp. 55-86). Paris : Blanchard.

Dhombres, J. (2008). Le compas et la règle comme figures de la mélancolie des mathématiques. Dans *Une traversée des savoirs : mélanges offerts à Jackie Pigeaud* (pp. 329-370). Presses de l'Université Laval.

Dhombres, J. (2015). An epistemological path through the historiography on Indivisibles. Dans V. Jullien (édit.), *Seventeenth Century Indivisibles Revisited* (pp. 391-450). Birkhäuser.

Dhombres, J. (AAAA). Confrontation de deux apprentissages du Calcul : Jean Bernoulli et Guillaume de l'Hôpital. *Sciences et techniques en perspective*, à paraître.

Dhombres, J., Pétin, P., & Poutrel, J.M. (AAAA). La bibliothèque de Roberval. *Sciences et techniques en perspective*, vol. 21, à paraître.

Dhombres, J., & Radelet-de Grave, P. (2009). *Une mécanique donnée à voir : les thèses de statique défendues à Louvain en 1624*. Turnhout : Brepols.

Dhombres, J., & Régnier-Roux, D. (2016), La « Bibliotheca mathematica » du XVII[e] siècle. *Sciences et techniques en perspective*, 19(1-2).

Elias, N. (2016). *La dynamique sociale de la science : sociologie de la connaissance et des sciences* (trad. fr. de l'anglais par M. Joly, D. Moraldo, M. Woollven et de l'allemand par H. Leclerc). Paris : Éditions de La Découverte.

Gabbey, A. (AAAA). *Gilles Personne de Roberval (1602-1675) : catalogue des manuscrits et des documents, documents inédits*. Paris : Archives de l'académie des sciences.

Gandt, F. de (1984-1985). Naissance et métamorphose d'une théorie mathématique : la géométrie des indivisibles en Italie (Galilée, Cavalieri, Torricelli). *Sciences et techniques en perspective*, 9, pp. 179-229.

Giusti, E. (1986). Le problème des tangentes de Descartes à Leibniz. *Studia Leibnitiana*, 14(1), pp. 26-37.

Hara, K. (1965). *Étude sur la théorie des mouvements composés de Roberval* (thèse de 3[e] cycle). Déposée au Centre Koyré.

Hara, K. (1971). Pascal et Wallis au sujet de la cycloïde. *Japonese Studies in the History of Science*, (10), 95-112.

Hara, K. (1981). L'œuvre mathématique de Pascal. *Memoirs of the Faculty of Letters Osaka University*, 21, 231-238.

Heinekamp, A., & Mettler, D. (1978). *Leibniz à Paris (1672-1676). Tome 1 : Les sciences*. Wiesbaden : Franz Steiner Verlag.

Itard, J. (1975). La lettre de Torricelli à Roberval d'octobre 1643. *Revue d'histoire des sciences*, 28/2, 114-124.

Jacoli, E. (1875). Ev. Torricelli ed il metodo dell tangenti detto Metodo del Roberval. *Bullettino di bibliografia e di storia delle scienze matematiche e fisiche*, 8, 269 *et seq*.

Jullien, V. (1996). *Éléments de Géométrie de Gilles Personne de Roberval*. Paris : Vrin.

Jullien, V. (édit.) (2015a). *Seventeenth Century Indivisibles Revisited*. Birkhäuser.

Jullien, V. (2015b). Roberval's indivisibles. Dans V. Jullien (édit.), *Seventeenth Century Indivisibles Revisited* (pp. 177-210). Birkhäuser.

Lenoble, R. (1971). *Mersenne ou la naissance du mécanisme*. Paris : Vrin. (1re édit. : 1943).

Malet, A. (1989). *Studies on James Gregory (1638-1675)* (PhD Thesis). Princeton.

Malet, A. (2015). Isaac Barrow's Indivisibles. Dans V. Jullien (édit.), *Seventeenth Century Indivisibles Revisited* (pp. 275-284). Birkhäuser.

Mancosu, P. (1991). Torricelli's infinitely long solid and its philosophical reception in the seventeenth century. *Isis*, 82(1), 50-70.

Maronne, S. (2018). Une autre Géométrie de Descartes : le problème des trois bâtons ou comment bien démêler les équations. Dans T. Gress (édit.). *Cheminer avec Descartes : concevoir, raisonner, comprendre, admirer et sentir* (pp. 313-341). Paris : Classiques Garnier.

Merker, C. (2001). *Le chant du cygne des indivisibles ou le calcul intégral dans la dernière œuvre scientifique de Pascal*. Besançon : Université de Franche-Comté.

Napolitano, P.D., & Saito, K. (2004). Royal Road or Labyrinth ? Luca Valerio's « De Centro Gravitatis Solidorum » and the Beginnings of Modern Mathematics. *Bollettino di storia delle scienze matematiche*, 24(2).

Nardi, A. (1994). Théorème de Torricelli ou théorème de Mersenne. *Études philosophiques*, (1-2), 87-118.

Panza, M. (2005). *Newton et les origines de l'analyse : 1664-1666*. Paris : Librairie Blanchard.

Panza, M. (2008). Isaac Barrow and the bounds of Geometry. Dans *Liber Amicorum Jean Dhombres* (pp. 365-411). Turnhout : Brepols.

Pedersen, K.M. (1968). Roberval's method of tangents. *Centaurus*, 13, 152-182.

Radelet-de Grave, P. (2015). Kepler, Cavalieri, Guldin : Polemics with the Departed. Dans V. Jullien (édit.), *Seventeenth Century Indivisibles Revisited* (pp. 57-86). Birkhäuser.

Rashed, R. (2018). *Fermat et les débuts modernes de la géométrie*. Olms.

Rochot, B. (1933). Sur Mersenne et le mot « cycloïde ». Dans C. de Waard, & B. Rochot (édit.). *Correspondance du P. Marin Mersenne : vol. 9* (pp. 584-586). Paris : Éditions du CNRS.

Scott, J.F. (1981). *The Mathematical work of John Wallis (1616-1703)* (second edition). New York : Chelsea Pub. Comp. (first edit. : 1938).

Souffrin, P. (1993). Galilée, Torricelli et la loi fondamentale de la dynamique scolastique : la proportionnalité velocitas-momentum revisitée. *Sciences et techniques en perspective*, 25, 122-134.

Teixeira, F.G. (1909). *Traité des courbes spéciales remarquables planes et gauches*. Coïmbre : Imp. de l'Université.

Weil, A. (1993). Introduction à *Oratio de Historia Cycloidis*. Dans *Die Werke von Jakob Bernoulli : Bd 4* (pp. 254-255). Birkhäuser.

Revue des Questions Scientifiques, 2019, 190 (3-4) : 349-383

La forme (animale) comme gratuite automanifestation

Adolf Portmann, Jacques Dewitte et quelques autres

Pascal Ide
Séminaire Saint Joseph (Bordeaux)
pi.roma@laposte.net

Résumé. – Cet essai introduit à l'intuition foncière d'Adolf Portmann (1897-1982), en particulier son ouvrage *Die Tiergestalt* (*La forme animale*). Sa thèse, aussi inédite que simple, est la suivante : *la forme animale est son automanifestation*. Ce que le naturaliste suisse montre scientifiquement, son commentateur aujourd'hui le plus autorisé, Jacques Dewitte, l'interprète philosophiquement. Nous en proposons à notre tour une relecture philosophique, en particulier à partir de la constitution mystérique ou épiphanique de l'être, et cette constitution à partir de l'amour comme autodonation interne. Ainsi Portmann propose une cosmologie où la beauté, le don, la gratuité et la forme priment sur le seul hasard, la seule lutte, la seule nécessité (utilité) et la seule matière.

Abstract. – This essay introduces the fundamental intuition of Adolf Portmann (1897-1982), notably from his book *Die Tiergestalt* (*Animal Forms and Patterns*). His theory, as novel as it is simple, is the following: *an animal's form is its self-representation*. What the Swiss naturalist demonstrates scientifically, his most authoritative commentator today, Jacques Dewitte, interprets philosophically. We, in turn, offer a philosophical re-reading, focussing on the mystical or epiphanic development of a being, and this development basing itself on love as inner self-fulfilment. Portmann thus proposes a cosmology where beauty, giving, freedom and form take precedence over sheer chance, minor struggle, simple necessity (utility) and mere matter.

Mots clés. – Amour — Animal — Beau — Darwin — Don — Forme

Table des matières

« *L'on ne découvre, dans l'ensemble corporel des organismes, aucun rouage superflu, aucune molécule inutile. [...] Mais il se manifeste* quelque chose de plus *dans la nature organique. Les "machines" y sont merveilleusement bariolées, élégantes, construites avec goût, pavoisées de fanions aux couleurs vives par centaines. [...] On a l'impression que toute cette machine saturée de raison n'a pour raison d'être que de* manifester cette splendeur*, au prix d'un gaspillage illimité d'énergie. Bref,* le monde organique est chargé d'une valeur démonstrative qui fait le prix de son être même » *(Buytendijk, 1952, pp. 6-7)*

1. Introduction

L'intention de cet essai est d'introduire au cœur de l'intuition profondément originale de ce grand naturaliste encore trop peu connu que fut Adolf Portmann (1897-1982) (Dewitte, 1999, pp. 9-31)[1]. Né à Bâle en 1897, il y passa sa thèse en zoologie en 1921 à l'université. Ayant étudié les années suivantes dans les universités européennes de München, Berlin et Paris (Illies, 1976), il revint dans sa ville natale pour rapidement devenir assistant à l'Institut de Zoologie, puis professeur de zoologie, en 1933. Enfin, en 1947, il fut nommé Recteur de l'Université de Bâle.

Chercheur en zoologie, il dédia à cette discipline une considérable production scientifique. Pédagogue reconnu, il rédigea un manuel de référence sur la morphologie comparée des vertébrés (Portmann, 1948), dont l'importance est telle qu'on l'abrégeait « le Portmann ». Il s'est aussi aventuré dans d'autres secteurs de la biologie comme l'éthologie (Portmann, 1953), voire en sociologie, en anthropologie ou en psychologie.

Son œuvre théorique est une ellipse gravitant autour de deux pôles : humanité et animalité. Son œuvre anthropologique porte sur l'ontogenèse humaine et la signification de la première année chez le petit d'homme ; son œuvre cosmologique est morphologique, c'est-à-dire porte sur la forme animale (et accessoirement végétale) comprise comme mode de manifestation, voire d'expression ou d'« autoprésentation » de l'animal. De fait, le biologiste alémanique s'est surtout fait connaître par deux livres : *Fragments biologiques pour une théorie de l'homme* (Portmann, 1944), portant sur l'ontogenèse humaine, et *La forme animale* sur lequel nous allons dorénavant centrer notre attention. Publié en 1948, ce dernier ouvrage, sans doute le plus original, fut remanié et amplifié dans une seconde édition, en 1960 (Portmann, 1960). Une fois n'est pas coutume, il fut traduit en France dès l'année suivante (Portmann, trad. 1961) ; mais gravement fautive (par méconnaissance du vocabulaire précis, voire technique, employé par l'auteur), cette traduction est aujourd'hui heureusement remplacée par celle de Georges Remy révisée par Jacques Dewitte (Portmann, 1960/2013).

Le livre de Portmann porte sur la *Gestalt* animale, ainsi que le titre l'indique. Sa thèse, aussi inédite que simple, peut s'énoncer ainsi : *la forme animale est son automanifestation* ; autrement dit, comme le notait la citation en

1. Sur l'œuvre et la personnalité de Portmann, cf. Dewitte (1999).

exergue, l'animal tend à se montrer en sa figure extérieure. Cette affirmation est d'une telle universalité qu'elle relève autant de la science que de la philosophie.

La perspective de notre travail sera philosophique ; elle relève précisément de la cosmologie philosophique. Aussi n'entrerons-nous dans le détail des considérations scientifiques pleines de finesse du zoologue alémanique que pour illustrer, mieux, nourrir l'induction, établissant son intuition. C'est pour la même raison que nous ferons beaucoup appel à son interprète philosophe aujourd'hui le plus autorisé, le belge Jacques Dewitte. En revanche, la relecture que nous proposerons au terme nous sera propre.

Après une induction établissant la thèse (§ 2), nous en écarterons les interprétations habituelles (§ 3) pour présenter en détail l'herméneutique propre à Portmann (§ 4) et une confirmation (§ 5). Enfin, nous en proposerons une relecture philosophique, analytique (§ 6), puis synthétique à partir de l'amour-don (§ 7).

2. Quelques faits

Induisons à partir de quelques exemples, choisis parmi les multiples illustrations, certaines frappantes, que propose Portmann et que je me permettrai d'enrichir à partir d'autres sources. Certains exemples concernent les formes, d'autres, les actions.

2.1. La plume de corneille

Au début de son ouvrage sur *La forme animale*, Portmann prend l'exemple de la plume pectorale d'une corneille « poussée par le vent sur notre chemin » (Portmann, 1960/2013, pp. 35-36). Trois traits sont frappants. D'abord, seule la partie terminale, la pointe, est d'un bleu noir chatoyant, le reste est un duvet gris clair. Ensuite, si nous considérons l'ensemble du somptueux manteau, les autres plumes sont, elles aussi, d'un gris clair quelconque. Enfin, si nous retournons une penne ordinaire, nous découvrons qu'autant l'endroit est couvert d'un dessin et d'une coloration parfois fort belle, autant l'envers est à peine teinté.

Ainsi, le vêtement richement coloré de la corneille s'étend à la seule partie visible. Nous pouvons nous arrêter à ce constat et l'enregistrer. Nous pouvons aussi l'interroger, car, pour être constantes dans le monde de l'oiseau, ces caractéristiques n'ont rien d'une évidence ou d'une nécessité.

2.2. De multiples exemples animaux

Dans le dernier chapitre, intitulé « Pour comprendre la forme animale », Portmann multiplie les exemples : de la roue du paon aux ailes de papillon en passant par les rayures du zèbre. Or, l'explication fonctionnelle « ne dit rigoureusement rien concernant la coloration de la huppe d'un oiseau ou des ailes d'un papillon ; on laisse complètement inexpliquée la forme spécifique des cornes ou des ramures ou les rayures du zèbre » (Portmann, 1960/2013, p. 261).

Certes, la roue du paon est un stimulus déclencheur pour la femelle ; mais celui-ci est constitué par quelques points ; donc, l'utilité n'explique pas la totalité de la roue.

Ajoutons une illustration tirée d'une autre œuvre de Portmann (1978, p. 356). L'on sait combien certains papillons diurnes présentent des dessins somptueux. Or, l'on a démontré expérimentalement que seuls certaines couleurs et certains dessins étaient pertinents pour leurs rôles fonctionnels (supposés). C'est par exemple ce qu'établissent les études de Diter Magnus sur le papillon Tabac d'Espagne (Magnus, 1958, pp. 397-426). Par conséquent, l'explication utilitariste ne peut rendre compte de la totalité de la morphologie.

Une nouvelle fois, l'approche fonctionnelle réduit la luxuriance des formes animales et végétales. Seule une part très mince de la forme de l'animal peut jouer un rôle utilitaire.

2.3. Les mycétozoaires

Dans la conclusion de son ouvrage, qui a été largement remodelée pour la seconde édition, Portmann considère un exemple de prime abord insignifiant, les mycétozoaires (autrefois appelés myxomycètes) (1960/2013, pp. 271-277). Ces animalcules (car il s'agit d'animaux) mucilagineux qui vivent sur un support humide, adoptent deux formes successives différentes. Au point de départ (l'on parle alors de plasmode), ils présentent

> « un degré d'organisation qui présente au microscope une masse plasmatique peu structurée et pourvue de nombreux noyaux. Ce plasmode vit généralement à l'intérieur de ses sols nourriciers, dans des tas de feuilles en décomposition, dans l'humus des forêts, dans le bois vermoulu des vieux troncs. Parfois la masse gélatineuse rampe jusqu'à la surface de son habitat, mais sans que cela donne lieu à des formes plus solides. Cette masse plasmatique, que nous

> devons considérer comme la forme de vie habituelle et quotidienne des mycétozoaires, ou bien est incolore ou bien elle affecte divers tons globaux et dans ce cas, il peut arriver que les plasmodes d'une même espèce aient des colorations différentes. C'est pourquoi les systématiciens, qui ont le sens de la valeur des propriétés (ce que Darwin appelait le tact systématique) ont renoncé depuis longtemps à considérer les couleurs de ces plasmodes comme un véritable caractère spécifique. Le tableau change lorsque l'animal mucilagineux s'équipe pour la reproduction et élabore ses sporanges ».

Portmann décrit seulement les sporanges qui

> « se dressent hors du plasmode et entrent en contact avec l'air [...]. Pendant cette phase de leur existence s'érigent de nombreuses formations mesurant parfois quelques millimètres ; elles sont composées d'innombrables cellules isolées, la structure plasmodiale étant abandonnée à cet effet. Cette masse d'organismes unicellulaires se déplaçant vers le haut agit comme si elle était guidée par un plan secret. Une partie forme une colonne centrale, une autre une membrane extérieure et la couche intermédiaire se transforme en des cellules reproductrices. Or, ces sporanges ont maintenant une forme extrêmement caractéristique d'une espèce à l'autre et ils se distinguent par des colorations qui, dans bien des cas, sont partiellement dues à des incrustations calcaires dans la membrane. Les couleurs et les dessins de ces sporanges sont (contrairement aux couleurs des plasmodes) utilisés par les systématiciens comme des caractères distinctifs ».

Un dernier fait doit attirer l'attention :

> « Ces êtres microscopiques qui, si on les agrandit, apparaissent de manière tout à fait frappante, ne peuvent avoir aucune signification pour le regard d'autres animaux, comme cela peut se produire pour des espèces plus développées, par exemple dans le cas des fleurs ou des fruits où des animaux interfèrent dans le processus de conservation de l'espèce. En effet, la dispersion des germes, quand les sporanges des mycétozoaires arrivés à maturité éclatent, se fait par le vent, par l'eau et par tous les hasards possibles, mais non pas parce que des animaux seraient attirés par les sporanges » (Portmann, 1960/2013, pp. 271-273).

Nous passerons plus loin des faits, à savoir l'apparition des couleurs et des formes, à leur interprétation, c'est-à-dire à leur explication. Relevons seulement que les mycétozoaires « ne sont là pour personne ». Ainsi, on ne peut les comprendre à partir d'une interaction, notamment utilitaire. Comment dès lors en rendre compte ?

2.4. Le chant de la fauvette

Passons de l'acte premier à l'acte second, de la figure aux comportements.

L'ornithologue Franz Sauer a travaillé sur le chant de la fauvette grisette (1954, pp. 10-93 ; Dewitte, 2010, pp. 37-39)[2]. L'oiseau a deux chants principaux. Le premier, appelé « chant spécifique » ou « chant permanent », est un chant juvénile (c'est-à-dire pratiqué avant la maturité sexuelle), mais est aussi un chant automnal qui se fait entendre plus tard dans l'année. Le second, appelé « chant à motifs » (*Motivgesang*), est un chant de la maturité sexuelle. Or, l'expérimentation montre que la fauvette s'adonne au chant spécifique dans un état d'isolement acoustique complet (on appelle cette situation « oiseaux Kaspar Hauser »), avec manifestement une grande jubilation. Mais les chants d'oiseaux n'ont d'utilité que vis-à-vis d'un autre oiseau (pour le prévenir, marquer le territoire, le séduire, etc.). Donc ce chant est gratuit, sans autre téléologie que lui-même. En revanche, le chant à motifs possède une finalité utilitaire : la recherche d'un partenaire sexuel et la possession d'un territoire. D'ailleurs, les spécialistes affirment que le chant spécifique est plus riche et plus beau que le chant à motifs. Or, la prodigalité caractérise ce qui est « pour rien », gratuit. Donc, chez la fauvette coexistent deux chants à finalités diverses, l'une utilitaire (la conservation de l'espèce), l'autre gratuite.

Il y a plus. Sauer a constaté que le chant à motifs est une version appauvrie du chant spécifique : au début, la forme musicale est différenciée et globale, puis, à partir du début de la période de maturité sexuelle, elle est progressivement simplifiée, pour, au terme, se réduire à quelques rengaines monotones. Or, le plus ne peut venir du moins. Donc, le chant gratuit n'est pas juxtaposé au chant utilitaire, il en est la source, l'élément fon(damen)tal. Voilà pourquoi on l'a qualifié de « permanent ».

On objectera que ce chant permanent ou spécifique n'est qu'apparemment gratuit : il est destiné à devenir le chant à motifs ; au point de départ, il permet à l'oiseau de faire ses gammes, de s'entraîner, avant de disparaître. Un fait déjà noté permet de répondre : dans le chant automnal, la fauvette s'adonne avec jubilation à une activité dénuée de toute fin utile ; par conséquent, cette capacité de fond demeure, les cantilènes utilitaires n'en étant qu'une des manifestations.

2. Cf. Sauer (1954). Il est résumé par Jacques Dewitte (2010, pp. 37-39).

2.5. Les parades sexuelles des crabes pugilistes

Empruntons au biologiste et ornithologue néerlandais (prix Nobel de médecine 1973) Nikolaas Tinbergen la description d'un phénomène peu banal, les parades sexuelles de certains crabes des mers chaudes, précisément le crabe *Uca* (*Uca pugilator*, appelé aussi « crabe violoniste ») vivant à Panama :

> « Chez le crabe *Uca pugilator*, l'attraction des femelles semble dépendre exclusivement d'un certain type de mouvement. La façon de brandir la grande pince qui sert à écarter les mâles aussi bien qu'à attirer les femelles, est très spécifique, et il est étonnant de voir comment il est possible de produire des résultats tellement différents au moyen d'un type de mouvement aussi simple. Crane, après avoir étudié vingt-sept espèces d'*Uca* à Panama, conclut que chaque espèce possède un type particulier de parade, si nettement différent de ceux de toutes les autres espèces observées, que des espèces étroitement apparentées ont pu être reconnues à distance rien que par ce caractère » (trad. 1971, p. 241).

Or, dans son grand cours sur la nature où il convoque nombre de biologistes, Merleau-Ponty cite ce passage (en se trompant de lieu : les îles Barnaves sont aussi réelles que les îles Fortunées…) et le commente en soulignant la gratuité :

> « C'est ainsi que chez les vingt-sept espèces de crabes des îles Barnaves, il y a vingt-sept types différents de parade sexuelle. Il ne faut pas voir dans cette manifestation de la sexualité le simple ornement d'un fait essentiel, qui serait le rapprochement des cellules mâles et femelles, car on ne comprendrait pas alors la richesse de ces manifestations. *La sexualité, si elle ne visait que l'utile, pourrait se manifester par des voies plus économiques* » (1995, p. 246).

2.6. Extension au végétal

Les feuilles des arbres des forêts tropicales donnent à voir des formes extraordinairement profuses. En effet, elles présentent des variantes innombrables dans « les nervures, les découpures ou les limbes des feuilles, leurs divisions et leurs formations symétriques » (1960/2013, p. 262). Or, la « variété infinie » des « formes des feuilles » « n'a été favorisée par aucune sélection de la part des animaux » (1960/2013, p. 161).

3. Interprétations classiques

Ce que nous avons montré inductivement, Portmann cherche aussi à en rendre compte causalement. Pour cela, le chercheur helvète écarte d'abord les explications qui lui semblent insuffisantes (l'utilité) ou erronées (le hasard). Nous l'avons déjà évoqué en passant. Rendons-en désormais compte systématiquement.

3.1. Interprétation par l'utilité

3.1.1. Exposé

L'interprétation aujourd'hui la plus fréquente de ces différents faits est celle de Charles Darwin. Selon le naturaliste anglais, la loi d'airain de l'évolution est la sélection naturelle, c'est-à-dire la compétition pour la survie du plus apte. Or, est utile le bien qui est mis au service d'un autre, subordonné à un autre. Comme la forme sert la fonction, la perspective darwinienne est donc foncièrement utilitariste. De fait, tous les exposés passés et actuels de biologie ne cessent de chercher comment telle couleur, telle structure, tel comportement, sont finalisés par la conservation belliqueuse de l'espèce — dit autrement, comment l'acquisition d'une compétence permet de mieux dominer.

3.1.2. Évaluation critique

Là contre, Adolf Portmann affirme que de très nombreuses formes naturelles ne possèdent pas de fonction utilitaire, ou en tout cas de fonction unilatéralement et même principalement utilitaire. Autrement dit, *les formes animales ne sont pas (ou pas seulement) utiles*. Pour l'établir, il avance plusieurs arguments, sans pour autant, à ma connaissance, les formaliser à part. Tentons de les systématiser.

Expliquer une réalité, c'est en rendre compte dans sa totalité. Or, l'utilité d'une forme donnée s'explique par quelques éléments, c'est-à-dire seulement une partie (souvent) petite du tout. Par conséquent, l'utilité n'explique pas la forme du vivant.

Par ailleurs, l'utilité première se traduit par l'économie des moyens. Or, la forme animale se traduit par une grande dépense en énergie, mais aussi par une variété extravagante. Donc, la forme animale ne peut s'expliquer par la seule utilité.

En outre (mais est-ce une autre formulation de l'argument précédent ?), dans une explication utilitariste, par exemple darwinienne, une mutation est sélectionnée parce qu'elle présente un avantage sélectif (pour l'auto-conservation ou la conservation de l'espèce). Or, certaines formes sont plutôt des désavantages sélectifs, à cause de leur handicap fonctionnel. Tel est par exemple le cas de la queue d'un Tragopan de Hastings (une espèce de paon). Donc, l'apparition de certaines formes ne peut s'éclairer à la lumière de la seule fonction utilitaire.

De plus, l'explication darwinienne est *a posteriori*. Jamais, elle ne peut rendre compte *a priori* de telle ou telle forme.

Les arguments ci-dessus sont synchroniques. Un dernier est diachronique. Expliquer une réalité, c'est rendre compte de son apparition. Or, la profusion des formes précède leur réduction à l'utilité. Donc, la forme animale ne s'explique pas par la (seule) utilité.

Enfin, illustrons notre propos en reprenant deux exemples étudiés ci-dessus. Pour les mycétozoaires,

> « la conception qui envisage le métabolisme servant à la conservation comme la fonction suprême de la vie ne peut considérer que comme insignifiantes les colorations des sporanges de ces animaux mucilagineux. Ce n'est pas un hasard si, même dans les travaux les plus récents, ces couleurs sont qualifiées d'accessoires en ce qui concerne le processus cellulaire, mais d'essentielles en regard de la distinction des genres et des espèces » (1960/2013, p. 273).

Conclusion :

> « Nous devons juger les sporanges de ces animalcules gélatineux selon d'autres critères que ceux qui ont prévalu jusqu'ici » (1960/2013, p. 274).

Pour les feuilles végétales, l'herméneutique darwinienne explique leurs formes par « l'écoulement de l'eau » et « la disposition en mosaïque des feuilles de nos arbres » par « l'absorption de la lumière ». Mais ces fonctions n'expliquent en rien leur « extrême richesse » de configuration et de disposition (1960/2013, p. 262).

3.1.3. Objections

On pourrait objecter que les chercheurs finissent toujours par trouver une utilité, une fonction à telle forme ou tel comportement. Je répondrai que,

d'abord, ce serait sombrer dans le sophisme du *post hoc, ergo propter hoc* ; ensuite, cette explication ne rend pas compte du fait premier : pourquoi la nature fait-elle preuve d'une telle inventivité ?

On objectera aussi que la forme n'a pas encore d'utilité connue, mais qu'un jour, on en percera la fonction. Je répondrai que, d'abord, un tel argument est non réfutable, donc non scientifique ; ensuite, il idolâtre l'avenir, qui devient porteur de tous les rêves et de la toute-puissance

3.2. Interprétation par le hasard

3.2.1. Exposé

Face à l'échec des explications darwiniennes par la sélection, donc par l'utilité, demeure une autre explication : le hasard. En effet, les sciences biologiques se sont focalisées sur l'intérieur du vivant, que ce soit son anatomie, sa physiologie, sa biologie moléculaire, son embryologie, sa génétique. Or, l'apparence est extérieure. Dès lors, l'étude de l'apparence, de la forme, n'est pas considérée pour elle-même ; plus encore, elle est analysée comme l'affleurement fortuit ou contingent de mécanismes internes, par exemple comme le dépôt en surface d'une excrétion chimique. Les couleurs éclatantes de tel poisson tropical, le pelage du tigre ou du zèbre auraient pu être autres.

3.2.2. Évaluation critique

Cette explication est plutôt une absence d'explication. En effet, les manifestations de la forme suivent des lois que Portmann cherche à établir dans son ouvrage sur la forme animale ; c'est même un des aspects les plus novateurs de son apport. Or, « néant de fin » encore plus que « de raison » (Hamelin, 1985, p. 125 ; Aristote, trad. 2000 [L. II, ch. 4 à 6] ; Mansion, 1945, pp. 292-314 [ch. 8, § 2])[3], le hasard est une cause accidentelle, qui est suscitée par la rencontre sans ordre de causes ordonnées.

3. Ainsi s'achève l'étude qu'Hamelin consacre au hasard chez Aristote : « Le hasard, ce néant de raison, devait être pour lui [Aristote], avant tout, un néant de fin » (Hamelin, 1985, p. 125). Cf. Aristote, *Physiques*, L. II, ch. 4 à 6. Pour le détail, cf. Mansion (1945, pp. 292-314 [ch. 8, § 2]).

4. Interprétation de Portmann

Portmann récuse l'explication par la seule utilité ou fonctionnalité, proposée par Darwin qu'il estime réductionniste, autant que l'explication par le seul hasard, c'est-à-dire l'absence de finalité. Quelle finalité Portmann se propose-t-il de lire dans les faits rapportés ci-dessus ?

4.1. L'autoreprésentation

La thèse de Portmann peut maintenant s'exprimer de manière affirmative : *la forme animale est une gratuite autoreprésentation*. Explicitons-en les deux termes.

Le biologiste appelle « *forme* », la figure extérieure, c'est-à-dire « le corps visible, l'apparence globale de l'animal », et qu'il distingue de la « *structure* », qui concerne les « membres particuliers, visibles ou invisibles » (Portmann, 1960/2013, p. 52).

Par ailleurs, la première édition de *La forme animale*, parlait de *Darstellungswert*, « valeur représentative ». Plus tard, il a précisé son vocabulaire, ajoutant que le mouvement interne conduisait à la représentation, et parlera de *Selbstdarstellung*, ce que traduit rigoureusement le néologisme « autoreprésentation ». On le retrouve dans la conclusion de la seconde édition (1960) de *La forme animale*. Ce nom désigne, écrit Portmann,

> « le fait qu'un être vivant, animal ou plante, ne pratique pas seulement le métabolisme et n'est pas explicable seulement comme un ensemble de structures servant à conserver la vie, mais que, par-delà la simple existence minimale et au-delà de toute nécessité, l'organisme édifie une forme qui représente précisément la particularité de cette espèce » (1974, p. 138).

En effet, Portmann considère comme un fait originaire que l'animal tend à apparaître, se donne à voir. Il n'entend point par là le constat banal et plat : l'animal est là. Mais il veut dire que l'être de l'animal est spontanément *incliné à apparaître*. Il est habité par une tendance à se montrer, à se donner à voir. Portmann assigne comme raison au festival cosmique des formes (et des attitudes) merveilleuses cette automonstration.

Nous avons par exemple vu que seules sont attirantes les parties visibles de la parure d'un oiseau. Or, ce qui est attirant retient l'attention. Donc, Portmann en conclut que l'animal « veut », aspire à être vu.

> « En insistant sur la valeur représentative [*Darstellungswert*], nous voulons ramener l'attention à la propriété la plus significative de la forme : faire apparaître la spécificité de telle espèce dans le langage des sens, attester cette spécificité de manière immédiate dans la forme » (1960/2013, p. 269).

Reprenons l'exemple des mycétozoaires :

> « Nous devons reconnaître un rang particulier à la structuration spécifique de l'une des phases vitales les plus importantes en attribuant à leur apparaître (couleur et forme) un sens qui n'est jamais mentionné parmi les fonctions de conservation de la vie le plus souvent citées : *le sens de la représentation, de l'autoprésentation de l'espèce* [...]. Ainsi prend tout son sens cette remarque des systématiciens qui considèrent la coloration des sporanges comme purement accessoire dans l'ensemble des processus vitaux, mais "essentielle" pour le classement systématique des espèces [...], parce qu'elle [la coloration] est une expression supérieure de la valeur propre, de l'autonomie de cet être plasmatique bien particulier » (1960/2013, p. 276).

On peut comprendre en creux cette auto-apparition en l'opposant non pas à la fonctionnalité ou à l'utilité, mais au *retrait* : une réalité pourrait tout simplement demeurer cachée, soit pour des raisons extrinsèques, par absence de lumière, soit pour des raisons intrinsèques, parce qu'elle se voilerait, demeurerait intérieure (comme le sont le cœur ou les autres organes). Or, tout au contraire, la cosmologie est cataphatique. Trop habitués à réserver l'apophatisme à Dieu, voire à l'homme, nous oublions de nous étonner que la nature soit si évidente, au sens étymologique du terme : elle se voit à partir d'elle-même. Sur ce point, Martin Heidegger peut nous éclairer (1958 ; 1973 ; trad. Fédier, 1968, pp. 165-276)[4].

Disons-le encore autrement. Si l'apparaître, « l'autoprésentation », n'a pas de sens quant à l'agir (en tout cas utile), il en a un vis-à-vis de l'être. Or, l'agir suit l'être. Donc, ce sens est autrement fondamental.

Tel est le donné premier. Il se subdivise ou se réfracte en plusieurs éléments qui en sont les composantes (objective et subjective, cognitive et affective), autant que les fondements (épistémologique et métaphysique).

4. Cf. notamment Heidegger (1976 & 1968, pp. 165-276).

4.2. La gratuité

Les formes présentes dans le monde animal s'expliquent (d'abord) par leur gratuité. Elles sont là pour elles-mêmes. Les artistes, qui n'en sont pas moins des observateurs de la nature, nous aident à mieux le comprendre. Par exemple, à la suite de Rostand, le chant matinal du coq pourrait être interprété comme un surcroît qui bénit gratuitement l'homme : « Ô soleil ! Toi sans qui les choses / Ne seraient pas ce qu'elles sont ! » (Rostand, 1910, acte 1, scène 2 ; Lloyd, 2010)[5] ou, à la suite de Messiaen, celui de l'oiseau qui lance gratuitement ses trilles au lever du soleil comme une célébration de la lumière (Ide, 2017, pp. 381-400).

Or, loin d'être accidentel, écrit Portmann à propos des mycétozoaires, « cet auto-façonnement gratuit, cette auto-présentation de l'être plasmatique pourrait bien, en fin de compte, être le sens premier et suprême de l'apparence vivante » (1960/2013, p. 278).

4.3. La beauté

Comment ne pas reconnaître que nombre de formes animales sont somptueuses ? Cette expérience est d'ailleurs largement transculturelle. Deux études d'un disciple de Portmann, spécialiste d'histoire de l'art, témoignent combien l'élégance est au cœur du monde animal (Prévost, 2009 & 2011). Souvent, en effet, les philosophes actuels se demandent si l'art est une activité seulement humaine ou s'il s'ébauche chez l'animal, comme une forme de protoculture. Mais une telle question est anthropomorphique et aveugle le regard. En fait, l'animal *ne fait pas* des œuvres d'art, il *est* une œuvre d'art :

> « Comment ne pas être saisi par l'élégance souveraine qui affecte très souvent les formes animales ? La précision des zébrures, veinures, marbrures et autres taches qui ornent le pelage de nombreux mammifères ; les couleurs éclatantes de la livrée des poissons tropicaux et des perroquets ; les dessins stupéfiants de régularité sur les coquillages ; la délicatesse et la minutie des motifs — bandes, rubans, ocelles — sur les ailes des papillons ; les plumes et leurs extraordinaires qualités : non seulement les couleurs et les motifs, mais encore tous les effets de brillance, de matité, de velouté, d'irisation... Cette élégance ne s'arrête pas aux formes locales mais caractérise encore

5. Edmond Rostand, *Chantecler*, Acte 1, scène 2. Sur cette interprétation éthique, et non pas esthétique, de la nature, dans cette apostrophe et l'œuvre du chrétien Rostand, cf., par exemple, Madame Sue Lloyd (2010).

> la configuration générale des animaux : pensons aux crêtes, aux crinières, aux queues, à toutes les formes d'appendice, aux ailerons... La sûreté, l'exactitude et la finesse de toutes ces formes font fatalement signe du côté non pas tant de nos arts plastiques (la peinture par exemple) que du domaine immense de l'ornementation et de la parure » (Prévost, 2009, para. 2).

Fils de Kant, nous ne pouvons manquer d'objecter : la beauté n'est-elle pas éminemment subjective ? Nous répondrons à cette difficulté dans la relecture philosophique. Quoi qu'il en soit, pour Portmann, cette beauté est un fait premier, au moins du point de vue de l'observateur, qui se fait ici contemplatif.

4.4. L'apparition

Pour notre auteur, l'animal, comme le végétal aussi, sont des merveilles inexplicables, mais la première merveille est qu'*ils se tiennent là* dans l'éblouissement de leur forme. Je me permets d'introduire une nouvelle note qui n'est pas formellement notifiée par Portmann, ni même par ses commentateurs autorisés comme Jacques Dewitte. L'*apparition* ne se distingue pas seulement du retrait ou de l'utilité, mais aussi de l'*apparence*. La langue allemande peut différencier *Schein* et *Erscheinung*, mais le naturaliste ne semble pas convoquer ces nuances. Quoi qu'il en soit, l'apparence est une apparition sans fond : qu'elle en soit privée (pur phénomène de surface) ou qu'elle s'en sépare pour tromper (tel est le sens de l'hypocrisie). Or, Portmann insiste souvent pour dire que la peau est le révélateur de l'intérieur et non pas le lieu où se déposerait par accident le supplément du fond, pire, comme par déchet.

> « L'apparence [mais il vaudrait mieux traduire apparition] fait partie intégrante du devenir global au même titre que la conformation typique des organes du métabolisme, des appareils locomoteurs, des structures nerveuses et sensorielles ou des organes de reproduction. Le développement des structures épidermiques opaques en des motifs colorés et des dispositifs formels propres à l'espèce est une partie tout aussi importante de l'ontogenèse préformée dans le germe que l'apparition de n'importe quel autre complexe de caractères » (1960/2013, p. 278).

4.5. L'absence de destinataire

Portmann dépasse son concept d'autoreprésentation dans l'édition enrichie de 1960 qu'il offre du chapitre final de *La forme animale* : l'apparaître du vivant peut se produire en *absence de récepteur*. Le fait est tellement frappant

que notre auteur le signifie par un nouveau nom : *unadressierte Erscheinung*, « apparition inadressée », ou « apparition sans destinataire », ainsi que traduit Jacques Dewitte (2001, pp. 207-223). « C'est le monde des “apparences inadressées” — celui qui considère les formes de vie autour de lui en gardant les yeux ouverts rencontrera un nombre sans cesse croissant de telles formes inadressées » (1960/2013, p. 278). Jusqu'à maintenant, il établissait la gratuité sur l'excédent de la forme à l'égard de sa fonction utilitaire, donc en fonction du récepteur. Maintenant, il constate que cette forme existe, *même si nul récepteur ne la connaît* et donc n'en bénéficie.

> « Le cas d'animaux qui n'ont pas d'appareil perceptif permettant de se voir mutuellement, mais qui ont des formes pourtant destinées à apparaître, lesquelles sont donc des “apparences véritables”, amène à considérer qu'il y aurait un “pur apparaître”, des apparences qui, provenant de l'auto-présentation, du “besoin” de l'espèce de manifester sa spécificité, seraient “lancées dans le vide”, sans être destinées à un organe perceptif déterminé, sans se laisser inscrire dans une relation préétablie entre une forme visible et un sens perceptif » (Dewitte, 2013, pp. 7-23 ; ici, pp. 17-18).

Dans la nature, des animaux peuvent ne pas se voir et pourtant se manifester. Voir, ce phénomène de l'apparition se produit en dehors de toute capacité sensorielle pour le recevoir, a fortiori pour le célébrer. Tel est le cas des mycétozoaires rapporté plus haut. Tel est aussi le cas de la fauvette qui peut faire résonner son chant automnal dans une pièce en total isolement acoustique, autrement dit face à aucun autre oiseau. De même, l'explosion des phanérogames, en leurs couleurs, leurs odeurs et leurs goûts, antérieurement à leur utilisation pour la pollinisation.

4.6. La rencontre sujet-objet

4.6.1. Exposé de la rencontre

Jusqu'à maintenant, nous avons considéré l'expérience fontale de Portmann du point de vue *objectif*. Mais elle présente une dimension *subjective* tout aussi importante. Pour comprendre Portmann, il faut considérer son attitude comme un tout, mobilisant la totalité de son être : pas seulement l'intelligence qui cherche à comprendre, mais aussi l'affectivité qui s'émerveille, se réjouit, voire rend grâces, et le sens esthétique qui admire la beauté.

> « Tout l'arc de la réflexion portmannienne se déploie entre ces deux pôles : l'expérience vécue des sens (*das Erlebnis der Sinne*) — la joie

> immédiate, sensible et sensuelle ressentie devant le spectacle du monde —, et les questions du sens (*die Fragen des Sinnes*) — l'interrogation sur la signification des apparences animales, sur leur raison d'être » (Dewitte, préf. 1960/2013, p. 22).

De fait, nous le savons, mais n'en avons pas assez conscience, les animaux possèdent des formes étonnantes. Nous reconnaissons, sans nul effort et du premier coup d'œil, la figure de centaines d'animaux différents. Qui ignore à quoi ressemble une girafe, un dauphin, voire le rhinocéros, dont Chesterton disait qu'à première vue, il apparaissait comme un extraterrestre ? « Une chose est de raconter une entrevue avec une créature qui n'existe pas, une gorgone ou un griffon. Autre chose est de découvrir que le rhinocéros existe et de s'amuser à constater qu'il ressemble à un animal qui n'existerait pas » (Chesterton, trad. Joba, 1984, p. 15). Or, ce fait étonnant s'explique par le caractère unique, signifiant de la forme. Comparativement, de combien d'autres êtres différents appartenant à même groupe connaissons-nous ainsi figures et noms ?

4.6.2. Caractéristiques de la rencontre

Or, cette rencontre entre le sujet contemplatif et l'objet qu'est la forme animale suscite en nous notamment l'étonnement, plus, l'éblouissement heureux. Dans son introduction, Portmann dit que « la compréhension plus vaste » qu'il propose des organismes requiert « un travail assidu », mais porteur « de *joie* ». Il poursuit : « Ce livre est né lui-même de cette *joie* et il voudrait la propager » (1960/2013, p. 29). Dans un avant-propos écrit pour la seconde édition et non repris par la traduction française, il résume, au terme, son intention de la manière suivante : « Ce livre est consacré à l'"apparence" animale et voudrait conduire à une *joie* ressentie à la richesse des formes » (Dewitte, préf. 1960/2013, p. 22).

Portmann confesse même, avec pudeur et enthousiasme, un autre sentiment : « Quand j'arrivai à l'âge où les noms des bêtes veulent dire quelque chose à un enfant, [...] je me mis à dessiner des animaux avec beaucoup d'*amour* » (1960/2013, p. 30). Ce faisant, le zoologue transforme la réception (ce qu'il a reçu) en don (l'amour et le respect) : « Peut-être jaillira-t-il çà et là de ce livre de quoi éveiller l'*amour* du vivant et le respect sacré devant l'inconcevable existence des formes animales » (1960/2013, p. 31).

4.6.3. Confirmations

Outre son contenu, *La forme animale* est hautement significatif pour deux autres raisons. La première est l'importance du dessin ou de la peinture. Loin

d'être anecdotique, ils donnent à voir, d'un coup, dans sa globalité, l'animal qui, alors que le lecteur feuillette ou étudie le livre, surgit à son regard, saute littéralement aux yeux. Ainsi, le vivant apparaît dans sa forme improbable, totalement inattendue.

La deuxième est la forme narrative parfois adoptée par le texte. Loin de proposer un exposé abstrait, *a fortiori* analytique, Portmann parle de sa découverte progressive d'un animal, de sa forme, de son étonnement. Or, en procédant ainsi, il fait entrer dans une rencontre.

4.6.4. Conséquence : l'humilité

Enfin, Adolf Portmann joint au sentiment d'émerveillement une disposition, l'*humilité*. La prétention darwinienne d'avoir offert la loi ultime de compréhension de la réalité est compréhensible. Mais ne va-t-elle pas avec une certaine immodestie, voire une certaine arrogance ?

> « Toute tentative d'explication hâtive serait inconsidérée devant la richesse et la diversité du monde animal. Il y a bien entendu dans cette diversité des cas comme [...] les colorations de protection, d'intimidation ou de mimétisme, mais ce sont là des cas d'espèce où le sens utilitaire de la coloration ou de la forme est particulièrement frappant. Mais que représente ce cabinet de curiosités choisies unilatéralement à côté de la richesse sauvage et débridée des formes dans le jardin des créatures ! » (1960/2013, p. 160).

Notre auteur invite donc au « sentiment de la grandeur étrange du devenir naturel » et à « la conscience du peu d'étendue de nos connaissances » (1960/2013, p. 162). Aussi propose-t-il aux biologistes de revenir à une description morphologique qui soit patiente et minutieuse. Qu'ils étudient d'abord toutes les lois de constitution des formes. Voilà pourquoi son ouvrage sur la forme animale propose tant de précieuses lois, ainsi que nous en donnerons quelques exemples plus bas.

4.7. L'interprétation intégrative

Jusqu'à maintenant, nous avons considéré la thèse de manière négative (écartant principalement la thèse contraire, qui est l'utilitarisme darwinien) et positive, en juxtaposant ces deux faces, ombrée et lumineuse. Envisageons ces deux points de vue de manière inclusive ou intégrative.

De ces différentes caractéristiques, nous pourrions déduire faussement que Portmann est un adversaire de l'utilitarisme. Au nom du raisonnement

suivant : le zoologue bâlois affirme que les formes animales apparaissent pour elles-mêmes, c'est-à-dire sans raison, sans raison autre que d'apparaître ; or, l'utilitarisme subordonne l'apparition à une finalité ultime, qui est la sélection et la conservation ; donc, la doctrine de l'autoprésentation exclut le fonctionnalisme utilitariste issu de Darwin.

Certes, Portmann s'élève fortement contre l'unilatéralisme darwinien. Il y aurait une contradiction à affirmer que la vie ne serait que la somme des conditions assurant sa sur-vie.

> « Dans cette perspective, d'innombrables caractères négligés des êtres vivants acquièrent une dignité nouvelle, alors qu'ils étaient considérés jusque là comme accessoires. Et s'ils étaient l'essentiel ? Si les êtres vivants n'étaient pas là afin que soit pratiqué le métabolisme, mais pratiquent le métabolisme afin que la particularité qui se réalise dans le rapport au monde et l'autoprésentation ait pendant un certain temps une durée dans le monde ? » (Portmann, 1958 ; trad. Dewitte, 1996, p. 137).

Toutefois, s'arrêter là conduirait à une interprétation erronée de la conviction de Portmann. Au contraire, son point de vue est *intégrateur*. À l'image de cette nature si généreuse qui combine le beau et l'utile, le naturaliste contemplatif souhaite conjuguer utilitarisme et anti-utilitarisme. Il ne s'agit pas de nier la fonction, mais d'en circonscrire le champ de validité. Plus encore, il s'agit d'introduire une hiérarchie : *la gratuité est première*, chronologiquement et ontologiquement. Ainsi, plutôt que de parler d'un anti-fonctionnalisme, il faudrait parler d'une intégration de la visée fonctionnaliste dans une visée plus large, dont elle émerge, qui est gratuite [6].

4.8. Le primat du médiocosme

Nous passons ici de l'expérience première à ses *présupposés*. Un premier présupposé est épistémologique. Portmann accorde un primat au monde médian qu'il appelle « médiocosme » (Dewitte, préf. 1960/2013, p. 9). Alors que la science privilégie la réduction aux éléments, donc à l'infiniment petit, ou envisage la globalité, donc l'infiniment grand, ou bien l'origine, donc le passé, Portmann fixe son attention sur le monde accessible aux sens, hors toute instrumentation et toute expérimentation. Dans l'avant-propos de la seconde édition déjà cité, Portmann écrit de son livre : « Il n'y sera que peu question du

6. Pour exprimer cette intégration, Portmann emploie un concept original, l'*enveloppement*. Il serait heureux d'en montrer la richesse épistémologique, voire ontologique.

merveilleux monde caché auquel seul le microscope nous donne accès » et précise qu'« il ne conduit pas non plus dans le royaume tout neuf des structures submicroscopiques » (Dewitte, préf. 1960/2013, p. 22).

4.9. Le surcroît

Un autre présupposé de l'autoreprésentation est son fondement *métaphysique* : ce que l'on pourrait appeler la loi comparative du *surcroît*. En effet, l'utilité est mesurée par le besoin de l'animal ou du végétal. Mais la forme animale apparaît pour rien. Elle présente donc un *excès* à l'égard de la seule fonctionnalité.

Mais il y a une autre raison, et plus décisive, au surcroît. L'animal ne s'épuise pas dans sa forme ; l'œil nu ne suffit pas à dire ce qu'est l'animal et la forme elle-même, en apparaissant, révèle un fond qui, lui, ne se communique pas ; ainsi cette contemplation « introduit une autre dimension » que le seul « monde visible » (Dewitte, préf. 1960/2013, p. 12) ; autrement dit, l'être de l'animal est habité par un *plus*.

Inversement, le darwinisme cherche à expliquer la forme par la fonction, donc proportionne la première à la seconde : il « considère cette extrême fonctionnalité, cette concordance accomplie de la forme et de la fonction comme le véritable ouvrage de la nature que l'homme dans ses créations devrait s'efforcer d'égaler » (Portmann, 1960/2013, p. 262). Mais c'est oublier que bien des formes n'ont pas de fonction ou plutôt ne se réduisent pas à la seule fonction qui leur est assignée. Donc, les formes animales représentent un surcroît, un excédent, un dépassement de la seule mesure.

4.10. Les lois morphologiques

Enfin, que la forme soit gratuite ne signifie nullement qu'elle soit arbitraire. Nous avons aussi vu que, si le naturaliste souhaite comprendre la forme animale, il doit se défier de lois trop hâtivement universalisées et revenir humblement à l'école de la nature. Nous l'avons aussi vu en négatif à partir de la prétention darwinienne à tout expliquer par l'utilité. Portmann invite donc à un patient et rigoureux inventaire des lois qui régissent l'apparition des formes du vivant, partant d'une observation des espèces et montant lentement du singulier vers l'universel.

C'est ainsi que *La forme animale* propose, chemin faisant, de multiples lois rigoureuses, même si elles sont exprimées de manière qualitative. On notera

aussi qu'elles sont souvent formulées de manière comparative. Elles émaillent tout l'ouvrage qui regorge de lois universelles — autant de signes de la profondeur de contemplation et de la sagesse de son auteur. En voici un échantillon :

1. « L'asymétrie [extérieure] est extrêmement rare chez les animaux ». Seules certaines éponges, qui sont des êtres très rudimentaires, sont « totalement asymétriques » (Portmann, 1960/2013, p. 45). La symétrie est donc le signe d'une perfection.

2. « L'apparence extérieure et l'intérieur du corps ont une force expressive différente » (Portmann, 1960/2013, p. 51). Précisément, alors que la forme extérieure est spécifique, la forme intérieure est générique, voire très générique (autrement dit, plus universelle).

3. « À une intensité de vie supérieure correspond un accroissement de toutes les surfaces internes dans les organes du métabolisme » (Portmann, 1960/2013, p. 44). En effet, un corps supérieur est un corps plus organisé ; or, l'organe doit être connecté aux autres organes ; or, la surface est le lieu de la communication, donc de l'unité ; ainsi, un vivant supérieur doit posséder plus de surface. On l'observe pour les arbres qui sont les végétaux supérieurs.

4. « Plus l'organisation générale et élevée, plus la tête est structurée de façon remarquable et propre à souligner son rôle directeur » (Portmann, 1960/2013, p. 264). Cette loi vaut pour tous les animaux, mais surtout pour les vertébrés.

5. « Le groupe hiérarchique supérieur est toujours celui qui présente une séparation des sexes » (Portmann, 1960/2013, p. 211). Tel est par exemple le cas des polychètes qui sont une classe de l'embranchement des Annélides. En effet, la séparation des sexes, qui s'oppose à l'hermaphrodisme, permet une plus grande différenciation.

6. « Plus l'organe se trouve situé vers la périphérie, plus les différences entre les espèces sont marquées ». Autrement dit, « Plus les différences sont externes, plus elles sont caractéristiques » (Portmann, 1960/2013, p. 267). Par exemple, les dents des mammifères sont dans la tête, donc à la périphérie ; or, elles « sont déjà formées spécifiquement dans leurs plus petits détails, indépendamment de leur rôle dans la dentition ».

7. « Plus elles [les différences] sont superficielles [c'est-à-dire observables en surface], plus elles sont spécifiques » (Portmann, 1960/2013, p. 267). Nous y reviendrons dans notre interprétation métaphysique.

5. Confirmations élargissantes

5.1. Confirmations philosophiques

Si l'immense majorité des chercheurs ignore Portmann et si les quelques connaisseurs de la communauté scientifique le boudent, pire, l'ostracisent, pour son décalage très intentionnel à l'égard de la vulgate darwinienne, en revanche, quelques philosophes, peu nombreux, mais racés, qui ont élargi leur intérêt au-delà du seul humain et, en grande partie, d'obédience phénoménologique (non inféodée au credo husserlien), l'honorent et le saluent : Karl Jaspers qui fut son collègue à Bâle ; Maurice Merleau-Ponty, dans son cours de 1957-1958 au collège de France sur la nature (1995, pp. 244-248) ; Hans Jonas, avec qui il entretient une correspondance dans les années 1950 ; Hannah Arendt (1981, pp. 41 *sqq*.)[7] qui, bien que philosophe du politique, donc de l'humain, s'inscrit peut-être dans le sillage de sa sensibilité allemande (qui n'est jamais loin de la *Naturphilosophie*), à moins que sa sensibilité féminine ne la dispose à l'attention portée par Portmann à la douceur cosmique *versus* la violence omniprésente dans le darwinisme… Relevons seulement trois exemples d'ailleurs bigarrés.

5.2. Confirmation en histoire de la pensée : l'inversion de la téléologie

L'intuition centrale du philosophe allemand contemporain Robert Spaemann, en tout cas du point de vue de l'histoire de la philosophie, est qu'avec la modernité, s'introduit un basculement qu'il appelle « *inversion de la téléologie* » (1963/1990)[8]. En effet, chez les Anciens et les médiévaux, l'étant, homme ou nature, visait une finalité qui le transcendait tout en l'accomplissant ; à partir des temps modernes, l'étant cherche une finalité qui lui est immanente et s'identifie à l'autoconservation, la préservation du soi. Voilà pourquoi Spaemann parle d'« ontologie bourgeoise ».

7. Cf. Arendt, 1981, pp. 41 et suiv. Dans un paragraphe intitulé « Renversement de la hiérarchie métaphysique : la valeur de la surface », Portmann est explicitement cité ; mais il est présent dans d'autres développements de manière implicite.

8. Il la développe dans un chapitre de sa thèse sur Fénelon (1963/1990) ; il s'intitule « Éthique bourgeoise et ontologie non téléologique » et fut réédité séparément dans un collectif centré sur ce thème de l'autoconservation dans la constitution de la modernité (Spaemann, 1981).

> « L'inversion de la téléologie signifie la rationalisation la plus rigoureuse en vue de la finalité individualiste, la subordination la plus rigoureuse de l'existence aux conditions de sa conservation. [...] Le bonheur et la jouissance qui ne peuvent se légitimer devant l'économie de l'autoconservation sont immoraux, agir selon des idées d'honneur sans pouvoir rationaliser son action en vue de l'autoconservation devient une donquichotterie » (1981, p. 81).

À cette première distinction, transcendance de soi-immanence ou autoconservation s'ajoute une seconde, encore plus surprenante, entre dynamique et statique.

> « À la place de la structure dynamique-téléologique en vertu de laquelle tout ce qui est est dirigé vers une activité qui lui est propre, cette activité, à son tour, étant dirigée vers la réalisation d'un *bonum* spécifique, apparaît maintenant une inversion de la téléologie : l'être ne s'élève plus à l'être-actif, mais l'activité elle-même a pour seul but la conservation de ce qui est de toute façon déjà » (1981, p. 80).

Il vaut la peine de souligner la révolution du regard à laquelle Spaemann nous invite. Nous sommes habitués à identifier la modernité à la créativité et à l'historicité. Or, tout au contraire, ici triomphe le même, c'est-à-dire le clos, et le statique.

Précisément, Spaemann situe cette rupture autour de deux penseurs de la Renaissance, Tommaso Campanella (1568-1639) et Antonio Telesio (1509-1588). Nous connaissons souvent mieux le troisième philosophe naturaliste de Naples, Giordano Bruno. Pourtant tous trois ont exercé une forte influence notamment sur l'éthique et la politique, et ont conduit à l'inversion de la téléologie. En effet, ils ont aboli la distinction aristotélicienne du vivre et du bien vivre. Or, le bien est un acte et une perfection, qui se distingue de la puissance et de l'imperfection où le sujet se trouve, et en oriente le mouvement. Dès lors, le bien se définit comme ce qui conserve en vie[9].

Ce qui est vrai de la philosophie l'est aussi de la science. De manière générale, « l'inversion de la téléologie s'accompagne d'une élimination de l'interrogation sur les fins poursuivies par les étants naturels eux-mêmes. Par une décision ontologique première, on leur dénie d'emblée toute capacité d'initiative, toute poursuite de fins, ainsi que toute *ipséité* (*Selbstsein*, *Selbstheit*) »

9. Spaemann adjoint à l'influence des trois Napolitains, deux théologiens et évêques français, Fénelon et Bossuet, qui se sont engagés dans la querelle du pur amour.

(2010, p. 110 [chap. 5])[10]. Cette inversion se vérifie plus particulièrement dans le champ de la biologie. Les deux témoignages qui suivent sont d'autant plus significatifs qu'ils émanent de chercheurs éminents (tous deux prix Nobel), et qu'ils sont frottés de philosophie :

> « Lorsque la biologie moderne parle de téléologie, lorsque des modèles cybernétiques simulent des structures téléologiques, le *telos* n'est à chaque fois compris que comme *telos* pour le système en question. On définit toujours la fonctionnalité par l'autoconservation » (Spaemann, 1996, p. 48).

> « La finalité [...] vise exclusivement et de manière démontrable l'engendrement d'une progéniture aussi abondante que possible, c'est-à-dire la survie de l'espèce — et rien d'autre » (Lorenz, 1983, p. 28).

Enfin, l'inversion de finalité triomphe dans l'évolutionnisme darwinien. En effet, Darwin assigne au vivant la seule conservation de l'espèce, alors que Portmann l'inscrit dans une visée qui le transcende vers une gratuité, introduit à nouveau une démesure. Donc, Darwin est un fruit de cette « inversion de la téléologie », alors que Portmann réagit contre cette « ontologie bourgeoise ». Autrement dit, si scientifique soit l'auteur de *L'origine des espèces*, il est imprégné à son insu par une philosophie qui l'aveugle et l'empêche de voir que le vivant ne se réduit pas à ce *conatus*.

> « L'être vivant [...] tend vers un but, mais qu'aucune volonté n'a choisi. Ce but, c'est de préparer un programme identique pour la génération suivante. C'est de se reproduire. Un organisme n'est jamais qu'une transition, une étape entre ce qui fut et ce qui sera. La reproduction en constitue à la fois l'origine et la fin, la cause et le but » (Jacob, 1970, p. 10).

5.3. Confirmations factuelles

Passons très succinctement le témoin à l'un des grands amateurs et promoteurs de l'œuvre de Portmann, le philosophe belge Jacques Dewitte qui confirme et illustre cet enveloppement de l'utilité dans la nécessité à partir d'autres activités comme l'ornement (d'après Dewitte, 2005/2010, chap. 3), l'architecture (d'après Dewitte, 2005/2010, chap. 4), le jeu (d'après Dewitte,

10. Dewitte, 2010a, p. 110. Cf., sur Spaemann, la synthèse du chap. 5 : « La vie est sans pourquoi, ou l'interrogation sur les finalités », ici pp. 107-113.

2005/2010, chap. 7), la contingence des phénomènes sociaux [11] et même la religion.

6. Relectures philosophiques

La méditation cosmologique de Portmann est riche de nombreuses résonances. Égrenons-en quelques-unes en épistémologie et en philosophie de la nature.

6.1. Quelques apports épistémologiques

Adolf Portmann a illustré, dans le domaine plus spécialisé des sciences biologiques, l'un des principaux mécanismes traumatiques de l'esprit : l'occultation intentionnelle, voire justifiée. En effet, ce que Francis Bacon appelle « idoles » (1986, p. 129 [I, Aph. 68]) et Bachelard « obstacle épistémologique » (1938, 1972) et que nous pourrions aussi, plus généralement, nommer *blessure de l'intelligence*, est la privation d'une lumière vitale de l'esprit, l'amputation d'une vérité qui est constitutive de son objet (Ide, 2013, pp. 169-188). Or, « on peut être familiarisé avec de nombreuses espèces animales, connaître à fond leur structure interne, leurs tissus et leurs organes et se soucier médiocrement de l'apparence extérieure d'un animal » (Portmann, 1960/2013, p. 27). Plus encore,

> « les travaux sur les lois générales de la vie [sur lesquelles ont travaillé les darwiniens] ont dissimulé au chercheur le spectacle des formes vivantes et leur richesse morphologique. Parfois même, cette tendance a été élevée au rang d'un renoncement héroïque, on a voulu faire de la mise entre parenthèses de la plénitude des formes une grandeur ascétique, un devoir du chercheur moderne ! » (Portmann, 1960/2013, p. 254).

Cette herméneutique navrée de la nature se traduit notamment par la fragmentation des discours et la dissémination du sens. Aujourd'hui, depuis la rupture galiléo-cartésienne — si clairement diagnostiquée par Whitehead

11. Nous avons vu plus haut que le gratuit débordait l'utilité et le contenait. Or, les anthropologues influencés par Mauss relèvent que, chez un certain nombre de peuples premiers, mais encore aujourd'hui, le travail, la société, ne se fondent pas sur la seule logique marchande du *do ut des*, donc de l'utilité, mais aussi, et plus encore, en amont, sur des relations dictées par une logique non-marchande qui est celle du don (cf., par exemple, Caillé, 1986, pp. 254-257).

ou Husserl —, nous vivons dans « un véritable Yalta ontologique » (Dewitte, préf. 1960/2013, p. 9) entre les multiples approches de la nature, en particulier entre approche objective (par exemple, scientifique ou philosophique) et approche subjective (par exemple, esthétique ou artistique), entre approche théorique (scientifique) et approche pratique (écologique).

Au contraire, la relecture émerveillée de la nature qu'offre Portmann donne toute sa place à une compréhension systématique aux côtés des approches scientifiques, philosophiques et écologiques de la nature. Autrement dit, réconciliant les transcendantaux *verum* (approche théorique), *bonum* (approche pratique, écologique) et *pulchrum* (approche esthétique), notre auteur introduit à une lecture polysémique et intégrative du cosmos (Ide, 2015, pp. 625-652 ; Ide, 2016, pp. 77-119).

6.2. Quelques apports cosmologiques

Ainsi que nous l'avons vu, Adolf Portmann — convaincu, que l'animal a quelque chose à nous révéler — a revalorisé ce qu'il nomme le « médiocosme » et ce que nous appelons le *mésocosme*, qui se caractérise du point de vue objectif comme monde médian ou intermédiaire entre l'infiniment petit et l'infiniment grand, et du point de vue subjectif, comme le seul monde accessible à la sensation humaine, donc à la connaissance commune, donc à la philosophie.

Par ailleurs, Portmann s'inscrit dans le prolongement de la grande tradition allemande de la *Naturphilosophie*, ce romantisme philosophique inconnu de la France : consciemment, lorsqu'il cite Goethe, mais inconsciemment, parce qu'il ne me semble connaître ni Schelling, ni, plus proche de nous, Hans André (Siewerth, 1959/2015). En particulier, nous retrouvons chez lui non pas tant la différence entre Dionysos (l'*hubris*) et Apollon, que celle, pythagoricienne, entre le *péras* (la limite) et l'*apéiron* (l'illimité).

Last but non least, Portmann se présente comme un critique acerbe de la vision finaliste de la nature. Cette affirmation étonne, car l'on interprète souvent la doctrine darwinienne ou néodarwinienne du vivant — dont il se distancie de l'unilatéralisme — comme un mécanisme qui valorise le hasard contre la finalité. En réalité, le zoologue a compris avec finesse et cohérence que le darwinisme est un téléologisme : tout vivant recherche sa conservation, celle de son individualité et, beaucoup plus encore, celle de son espèce. Or, tout au contraire, les observations de Portmann l'ont conduit à constamment valoriser la gratuité, autrement dit le sans raison ou le sans fin (qui ne serait qu'un *conatus essendi*). Le problème du darwinisme n'est donc pas son prétendu anti-fi-

nalisme, mais son *auto-finalisme*, la téléologie centrée sur le seul vivant, et donc sur son utilité, autrement dit sa relecture réductrice de la finalité. En regard, la cosmologie de Portmann permet de réinterpréter la finalité en en conjurant les trois principaux risques : une conception trop individualiste (la finalité comme achèvement interne), trop déterministe (la finalité comme détermination) et finitiste (la finalité comme clôture).

7. Relecture à l'aune de l'amour-don

Enfin, Adolf Portmann confirme et enrichit au ras de la cosmologie bien des lois de la métaphysique de l'être-don. Passons brièvement en revue les trois moments du don — réception, appropriation (qui conduit à la constitution ontophanique) et donation (ou reddition) — et leur moteur intime — l'amour-don (Ide, 2011, pp. 19-54; 2014b, pp. 297-323; 2017, pp. 95-128; 2018b, pp. 29-56; 2018a, pp. 436-452)[12].

7.1. Réception gratuite : le transcendantal beau

Dans son seul ouvrage de pure philosophie, *Wahrheit* (et, plus tard, dans l'esthétique théologique), le théologien suisse Hans Urs von Balthasar explique la beauté non pas à partir de la seule forme (voie objective ou cosmologique) ni à partir du seul plaisir (voie subjective ou anthropologique), mais à partir de la gratuité (voie métaphysique et, ultimement, théologique) : transcendantal, donc *passio entis*, le beau est l'étant dans sa donation sans raison, autrement dit l'apparition imméritée de l'être (Balthasar, 1947 [III.C.2]). Or, de même, Portmann insiste pour dire que l'être est un apparaître (qui n'a rien d'une apparence) et un apparaître qui n'a pas d'autre raison que lui-même.

Au terme de sa vie, dans *Epilog*, Balthasar « définit » le beau comme un *sich-zeichen*, un « se-montrer » (Balthasar, 1987 [II.5]). Or, très expressément, presque avec les mêmes mots, Adolf Portmann affirme que l'être de l'animal ne peut être découplé de son apparaître. L'animal est habité par une intention (phénoménologie) ou un éros, un appétit (métaphysique de Platon ou d'Aristote) : celle d'apparaître sur le théâtre du monde. Le vivant veut se manifester, s'exprimer, avant toute perception humaine. À moins que le spectateur ne soit l'ange…

12. Sur cette métaphysique de l'être comme amour-don, nous nous permettons de renvoyer à Ide (2011 ; 2014 ; 2017 ; 2018a ; 2018b).

Cette beauté de la nature qu'il célèbre, Portmann la pratique. En effet, il dessine les animaux avec un art consommé, ainsi que l'attestent les illustrations de *La forme animale*. À la manière des naturalistes de l'ancienne mode — il me semble que Goethe et Fabre dessinaient aussi.

7.2. L'appropriation : la structure ontophanique

Dans un fragment fameux, Héraclite affirme : « *Phusis kruptesthai philéi* : la nature aime se cacher » (Héraclite, trad. 1988, p. 173 [*Fragment* B CXXIII] ; p. 158 [*Fragment*, B LIV] ; p. 166 [*Fragment*, B LXXXVI] ; Hadot, 2004). Mais il ne dit que la moitié de la vérité : la nature aime aussi et d'abord à se révéler. Toute l'œuvre d'Adolf Portmann est un hymne à la constitution ontophanique. En effet, le naturaliste ne cesse de dire que, si la forme est gratuite, en revanche, elle exprime bien l'intériorité. Ces observations permettent aussi de préciser certaines conséquences de cette structure épiphanique. Le zoologue suisse a constaté, ainsi que nous l'avons noté ci-dessus : « Plus elles [les différences] sont superficielles, plus elles sont spécifiques » (Portmann, 1960/2013, p. 267). Or, la superficialité doit se prendre ici en un sens ontologique, spatial, comme caractéristique de la surface, non pas en un sens axiologique, évaluatif, en l'occurrence négatif. Mais la structure ontophanique nous apprend que le fond se manifeste dans l'extériorité, en quelque sorte éclate à la surface.

Ici, encore, nous croisons les pas de Martin Heidegger. Revenons au fragment 123 d'Héraclite. L'interprétation habituelle est : l'être étant difficile d'accès, il faut beaucoup d'effort pour le débusquer et lui faire passer le goût de jouer à cache-cache (tel est le projet de la modernité scientifique depuis le *Novum organum* de Francis Bacon). Mais c'est le contraire qui est vrai : « se retirer, s'héberger soi-même en son propre retrait appartient à la prédilection de l'être ». En effet, ce retrait affermit le déploiement de l'être. Or, « le déploiement de l'être, c'est de se déclore, de s'épanouir, de ressortir dans l'ouvert du non-retrait », ce qui est justement la *phusis* : celle-ci, telle qu'elle a été analysée, est la venue dans la présence de ce qui est retiré. Voilà pourquoi le *kruptesthai* comme l'*apocaluptein* font partie de l'être comme de la *phusis*. Et nous touchons ici à l'essence de l'*alèthéia* : « l'ouvert du non-retrait se dit *a-lèthéia* » (Heidegger, 1958 ; 1973 ; trad. 1968, p. 276).

7.3. Donation : primauté de la gratuité et loi d'autocommunication

Le don est un acte désintéressé, sans retour. Or, la forme animale est de même une donation sans autre raison d'être qu'elle-même. Après avoir lon-

guement médité sur les travaux de nombreux biologistes, dont Portmann, Merleau-Ponty généralise en affirmant que non seulement la vie est irréductible à l'utilité, mais que la gratuité la précède :

> « Il faut critiquer l'assimilation de la notion de vie à la notion de poursuite d'une utilité, ou d'un propos intentionnel. La forme de l'animal n'est pas la manifestation d'une finalité, mais plutôt d'une valeur existentielle de manifestation, de présentation. Ce que montre l'animal, ce n'est pas une utilité ; son apparence manifeste plutôt ce qui ressemble à notre vie onirique. Sans doute, en un certain sens, le cérémonial est-il utile mais il n'est utile que parce que l'animal est ce qu'il est. Une fois qu'elles sont, ces manifestations ont un sens, mais le fait qu'elles soient telles ou telles n'a aucun sens. De même que l'on peut dire de toute culture qu'elle est à la fois absurde et qu'elle est le berceau du sens, de même toute structure repose sur une valeur gratuite, sur une complication inutile » (1995, p. 246).

Plus encore, comment ne pas noter la convergence profonde entre cette superbe découverte qu'est l'« apparition inadressée », ou « apparition sans destinataire », et la loi d'autocommunication ?

7.4. La dynamique totale : l'amour

Jacques Dewitte propose un développement sur l'ornement, soulignant qu'il présente la même signification ontologique que la forme animale : s'il est utile, il est d'abord gratuit. Or, ajoute-t-il, « orner est un acte d'amour » (d'après Dewitte, 2005/2010, p. 73). En effet, aimer, c'est se donner ; l'amour authentique n'aime pas parce que l'autre est beau, mais pour que l'autre soit beau. À cette intention, il prend l'exemple des Florentins : ils « n'ont pas aimé leur cité parce qu'elle était belle, grande et couverte de gloire », mais « ils l'ont parée et ont recherché pour elle la gloire parce qu'ils l'aimaient et l'honoraient déjà » (d'après Dewitte, 2005/2010, p. 73). Et de citer Chesterton qui donne cet exemple : « Les peuples ont d'abord honoré un lieu, ensuite, ils ont conquis pour lui la gloire » (Chesterton, 1984, p. 102). Donc, analogiquement, la signification ontologique de la forme animale relève d'une intention ou d'une « visée aimante » (d'après Dewitte, 2005/2010, p. 73).

Ajoutons que nous retrouvons ici la loi de *symbolisation* (qui précise la loi d'autodonation) qui est une loi de l'amour. En effet, l'ornement trouve son sens le plus profond dans sa visée aimante ou amoureuse, au-delà de sa visée intentionnelle de l'objet (ornement de quelque chose). En effet, l'ornement ne rend pas l'objet aimable. Convoquons une nouvelle fois Chesterton :

> « La décoration n'est pas destinée à cacher un objet horrible, mais à décorer un objet adorable. Une mère ne met pas un ruban bleu à son enfant parce qu'autrement il serait laid. Un amoureux n'offre pas un collier à une fille pour lui cacher le cou » (Chesterton, pp. 101-102).

Aristote offre une confirmation inattendue à cette vision ontodative. L'on connaît le cardiocentrisme du Stagirite. Celui-ci est statique, mais aussi dynamique. Or, il entraîne une vision ontophanique qui, elle-même, demande à être interprétée comme une communication *ad intra*, autrement dit comme une autodonation (Ide dans Tourpe, 2018, pp. 29-56, § 1).

D'abord, le Stagirite comprend le processus de locomotion comme une autocommunication par expansion progressive. En effet, la locomotion prend son origine dans le cœur ou dans son voisinage immédiat : toutes les sensations aboutissent, directement ou non au cœur (Aristote, trad. 2011 [L. II, 10, 656 a 27-32 ; L. III, 3, 665 a 10-17]) ; or, les sensations se transforment en images et celles-ci, à leur tour, éveillent différentes affections ; or, enfin, les désirs mettent en branle la locomotion (Aristote, trad. 2011 [L. III, 6, 701 a 2-6]) ; donc, cette dernière prend sa source dans le cœur (Aristote, trad. 2011 [L. III, 6, 700 b 10-11]).

Puis, partant de ce centre qu'est le cœur, les processus moteurs, d'insignifiants, prennent de plus en plus d'ampleur au fur et à mesure qu'ils s'approchent de la périphérie (Aristote, trad. 2011 [L. III, 7, 701 b 30-32]). Par conséquent, l'âme met progressivement en mouvement tout l'animal, à partir de son centre. Autrement dit, l'animal est habité par un processus d'autocommunication interne de type centrifuge (et sans doute aussi centripète) à partir du cœur (Aristote, trad. 2011 [L. III, 7, 670 a 23-26]). On a souvent davantage insisté sur l'organisation harmonieuse admirable qui fait comparer le corps à un état politique bien administré (Aristote, trad. 2011 [L. III, 10, 703 a 23 – b 1])[13], mais il se dit aussi qu'Aristote décrit, sans en faire la théorie, une constitution ontophanique, lamellaire ou mandalique de l'animal, jusque dans sa dynamique.

8. Conclusion

D'une curiosité universelle comme Goethe, le grand biologiste bâlois Adolf Portmann nourrit aussi avec l'illustre penseur allemand une fascination pour le

13. Cf. Aristote, *Les parties des animaux*, L. III, 10, 703 a 23 – b 1.

vivant comme tout et pour le tout (du monde) vivant ; plus encore, ce chrétien convaincu est habité par la conviction que le monde est *mystère* (Ide, 1985).

Sa vision de la nature, ici ébauchée, pourrait se résumer par le primat de la beauté, de la gratuité et de la forme sur le seul hasard, la seule nécessité (utilité) et la seule matière. En ce sens, Portmann a élaboré ce que le philosophe allemand Hans Jonas appelle une « biologie philosophique » :

> « Une biologie non philosophique est une biologie purement physique [qui] ignore que l'objet dont elle s'occupe a aussi un sentir, qu'il sent, espère, craint ou a peur, éprouve l'avidité, la faim, la soif, etc. [...] Une biologie philosophique est celle qui [...] dans l'examen de l'organisme n'oublie jamais qu'il n'est pas seulement un ensemble au sens fonctionnel, mais aussi au sens psychosomatique. C'est-à-dire que l'aspect intérieur ou la subjectivité de l'organisme est aussi indispensable pour une compréhension biologique de l'objectivité de l'organisme » (1991, p. 105).

Osons une dernière hypothèse. La *Naturphilosophie* de Portmann fait rimer cosmos avec éros (Ide, 2010, pp. 459-601 ; 2014a, pp. 9-101 ; 2019, à paraître)[14]. Il en confirme plusieurs thèses centrales : la loi d'excès, la loi d'autocommunication et donc de gratuité, la constitution ontophanique, la tendance à la communion, etc. D'ailleurs, même si l'on est en droit de regretter que Balthasar qui cite surtout Hans André n'ait pas davantage exploré l'œuvre de Portmann, il est vrai moins spéculatif, plus d'une raison invite à rapprocher intellectuellement le théologien et le naturaliste que la géographie s'était déjà chargée de faire cohabiter (ils sont tous deux Bâlois), dont la moindre n'est pas leur commune fascination pour la forme (*Gestalt*)[15]. Or, André esquisse cette cosmologie ontodative que Balthasar appelait de ses vœux.

L'admirable cosmologie de Portmann n'a pas encore bénéficié de la réception, scientifique, mais aussi philosophique, voire théologique, qu'elle mérite. Son potentiel est proprement révolutionnaire, en biologie comme en philosophie de la nature.

14. Nous avons ébauché quelques prémisses d'une telle cosmologie fondée sur l'amour compris de manière analogique notamment dans (Ide, 2010 ; 2014 ; 2019).

15. En ce sens, la cosmologie de Portmann s'inscrit dans le cadre plus général d'une approche *morphologique* de la nature. Pour le sens de cette expression, cf., par exemple, Boutot, 1993.

Bibliographie

Arcy Thompson, W. d' (1994). *Forme et croissance* (trad. D. Teyssié). Paris : Seuil.

Arendt, H. (1981). *La vie de l'esprit.* 1. *La pensée* (trad. L. Lotringer). (Philosophie d'aujourd'hui). Paris : P.U.F.

Aristote (trad. 1956). *Les Parties des animaux* (trad. P. Louis) (Les Universités de France). Paris : Les Belles Lettres.

Aristote (trad. 1926). *Physique* (trad. H. Carteron ; vol. 1) (Les Universités de France). Paris : Les Belles Lettres.

Bachelard, G. (1972). *La formation de l'esprit scientifique : contribution à une psychanalyse de la connaissance objective*. (Bibliothèque des textes philosophiques). Paris : Vrin. (édit. orig. : 1938).

Bacon, F. (1986). *Novum organum* (intro., trad. et notes par M. Malherbe et J.-M. Pousseur). (Épiméthée). Paris : P.U.F.

Balthasar, H. U. (von) (1947). *Die Wahrheit*. Einsiedeln : Benziger et Co. Ag.

Balthasar, H. U. (von) (1987). *Epilog.*, Einsiedeln : Johannes.

Berthoud, G., & Busino, G. (1999). Animalité et humanité autour d'Adolf Portmann. Dans *XVe colloque annuel du Groupe d'étude « Pratiques sociales et théories »*. RESS (CVP), 37(115). Genève : Droz.

Boutot, A. (1993). *L'invention des formes*. Paris : Odile Jacob.

Buytendijk, F. J. J. (1952). *Traité de psychologie animale* (trad. Alb. Frank-Duquesne). Paris : P.U.F.

Caillé, A. (1986). *Splendeurs et misères des sciences sociales*. Paris : Droz.

Chesterton, G. K. (1984). *Orthodoxie* (trad. A. Joba). (Idées ; 504). Paris : Gallimard.

Dewitte, J. (1993). La donation première de l'apparence, ou l'autoreprésentation du vivant selon Adolf Portmann. *Ce que donner veut dire. Don et intérêt, Revue du MAUSS*, nouv. série, (1).

Dewitte, J. (1999). Animalité et humanité : une comparaison fondamentale. Sur la démarche d'Adolf Portmann. *Revue européenne des sciences sociales*, 115, 9-31[16].

Dewitte, J. (2001). Adolf Portmann et l'« apparence inadressée ». *Le vivant. Prétentaine*, 14-15, 207-223[17].

Dewitte, J. (2008). La vie est sans pourquoi. Redécouverte de la question téléologique. *Revue du MAUSS*, 31(1), 435-465.

Dewitte, J. (2010a). *La manifestation de soi : éléments d'une critique philosophique de l'utilitarisme*. (Textes à l'appui). Paris : La Découverte.

Dewitte, J. (2010b). Une valeur gratuite, une complication inutile. Maurice Merleau-Ponty lecteur des biologistes. *Revue du MAUSS*, 35(1), 333-363.

Dewitte, J. (2013), Préface. Dans A. Portmann, *La forme animale* (trad. G. Remy et J. Dewitte) (pp. 7-23). Paris : Éditions La Bibliothèque.

16. Il s'agit de la conférence inaugurale d'un colloque sur Portmann, à Lausanne.
17. Loin de faire doublon avec le précédent, cet article insiste sur d'autres aspects de l'œuvre de Portmann, à la fois postérieurs, continus à *La forme animale*, et novateurs.

Fleury, V. (2003). *Des pieds et des mains. Genèse des formes de la nature*. Paris : Flammarion.

Hadot, P. (2004). *Le voile d'Isis : l'histoire de l'idée de nature*. Paris : Gallimard.

Hamelin, O. (1985). *Le système d'Aristote*. (Bibliothèque d'histoire de la philosophie). Paris : Vrin.

Heidegger, M. (1958). Vom Wesen und Begriff der *Physis*. Aristoteles, Physic B, 1 [« De l'essence et du concept de *Phusis* selon Aristote, *Physique*, L. II, chap. 1 »]. Dans *Gesamtausgabe* 9. Frankfurt-am-Main : Klostermann.

Heidegger, M. (1968). Ce qu'est et comment se détermine la *phusis* (trad. Fr. Fédier). Dans *Questions II*. Paris : Gallimard. (1976).

Héraclite (1988), *Fragment* B cxxiii, de Thémistius. Dans Dumont, J.-P. (édit.). *Les présocratiques*. (Bibliothèque de la Pléiade). Paris : Gallimard.

Ide, P. (1995). *Être et mystère. La philosophie de Hans Urs von Balthasar*. (Présences ; 13). Namur : Culture et vérité.

Ide, P. (2010). La philosophie de la nature de Charles de Koninck. *Laval théologique et philosophique*, 66(3), 459-601

Ide, P. (2011). Une métaphysique de l'être comme amour : relation ou substance ?. *Comprendre. Revista catalana de filosofia*, 13(2), 19-54.

Ide, P. (2013). *Connaître ses blessures*. Paris : L'Emmanuel.

Ide, P. (2014a). La création, entre agression et amorisation. Un enrichissement du mécanisme de sélection naturelle ? Dans Quentin, Ph. (édit.). *Les sciences face au concept judéo-chrétien de création. Colloque de l'ICES, 21 et 22 janvier 2013* (pp. 9-101). Paris : L'Emmanuel.

Ide, P. (2014b) L'être comme amour. Premières propositions autour de l'acte et de la puissance. Dans Lagrut, B., & Vetö, É. (éds.). *La vérité dans ses éclats : foi et raison* (pp. 297-323). Paris : Ad Solem.

Ide, P. (2015). Une lecture polysémique de la nature. Trois propositions pour un discours des méthodes. *Lateranum*, 81 (3), 625-652.

Ide, P. (2016). Une lecture polysémique de la nature. Trois propositions pour un discours des méthodes. *Lateranum*, 82, 77-119.

Ide, P. (2017a). L'amour est l'acte suprême de l'être. La philosophie de Hans-Urs von Balthasar : réception et chantiers. *Transversalités*, 144, 95-128.

Ide, P. (2017a). La théologie de l'amour dans quelques écrits d'Olivier Messiaen. Colloque « Messiaen, la force d'un message », Académie royale de Belgique, Bruxelles, 4-5 mai 2012. *Science et Esprit*, 69(3), 381-400.

Ide, P. (2018a). Lumière, être et amour. *Nouvelle revue théologique*, 140 (3), 436-452.

Ide, P. (2018b). Métaphysique de l'être comme amour. Quelques propositions synthétiques. *La métaphysique*, numéro coordonné par E. Tourpe, *Recherches philosophiques*, 6(1), 29-56.

Ide, P. (2019, à paraître). Amour humain et altruisme animal. Dans B. Schumacher (édit.).

Jacob, F. (1970). *La Logique du vivant. Une histoire de l'hérédité*. (Bibliothèque de philosophie). Paris : Gallimard.

Lloyd Madame, S. (2010). L'amour de la nature chez Rostand et dans *Chantecler*. Dans *Colloque centenaire de Chantecler, Arnaga, 25 et 26 juin 2010*. Récupéré de http://www.rostand-arnaga.com/Documents/Lloyd.pdf

Lorenz, K. (1983). *Der Abbau des Menschlichen*. München, Piper.

Mansion, A. (1945). *Introduction à la physique aristotélicienne.* (Aristote. Traductions et études). Paris : DDB ; Louvain : Éditions de l'Institut Supérieur de philosophie.

Merleau-Ponty, M. (1995). L'étude de l'apparence animale de Portmann. Dans Séglard, D. (édit.). *La Nature. Notes. Cours du Collège de France* (pp. 244-248). (Traces écrites). Paris : Seuil.

Portmann, A. (1958). Selbstdarstellung als Motiv der lebendigen Formbildung. Dans *Geist und Werk : Aus der Werkstatt unserer Autoren. Zum 75. Geburtstag* (von Dr. Daniel Brody). Zurich : Rhein Verlag.

Portmann, A. (1964). *New Paths in Biology* (trad. angl.). New York : Harper and Row. (édit. orig. : 1961)

Portmann, A. (1966). L'autoprésentation, motif de l'élaboration des formes vivantes Dans Dewitte, J. (1996). *Études phénoménologiques : Phénoménologie et philosophie de la nature*, 23-24, 131-164.

Portmann, A. (1968). Préface. Dans *La vie et ses formes*. Paris : Bordas.

Portmann, A. (1969). *Le forme viventi* (trad. it.). Milano : Adelphi. (édit. orig. : 1965).

Portmann, A. (1974). *An den Grenzen des Wissens*. Wien-Düsseldorf : Econ Verlag.

Portmann, A. (2013). *La forme animale* (trad. G. Remy et J. Dewitte). Paris : Éditions La Bibliothèque. (édit. orig. : 1960).

Prévost, B. (2009). L'élégance animale. Esthétique et zoologie selon Adolf Portmann. *Images Re-vues* 6, mis en ligne le 01 juin 2009, consulté le 30 septembre 2016. Récupéré de http:// imagesrevues.revues.org/37

Prévost, B. (2011). Les apparences inadressées. Usages de Portmann (doutes sur le spectateur). Dans Prévost, B., & Rougé, B. (édit.). *L'Adresse. XVIe colloque du Cicada*. Pau : Presses Universitaires de Pau.

Rostand, E. (1910). *Chantecler*. Paris : Charpentier et Fasquelle.

Sauer, Fr. (1954). Die Entwicklung der Lautäußerungen vom Ei ab schalldicht gehaltener Dorngrasmücken (*Sylvia c. communis*, Lathan) im Vergleich mit später isolierten und mit wildlebenden Artgenossen. *Zeitschrift für Tierpsychologie*, 11(1), 10-93.

Siewerth, G. (2015). *La philosophie de la vie de Hans André* (trad. E. Tourpe, introduction et commentaire de P. Ide). Paris : DDB.

Spaemann, R. (1981). Éthique bourgeoise et ontologie non téléologique. Réédité séparément dans Ebeling, H. (édit.), *Subjektivität und Selbsterhaltung*. Frankfurt am Main : Suhrkamp.

Spaemann, R. (1990). *Reflexion und Spontaneität : Studien* über Fénelon (réédition). Stuttgart : Klett Verlag. (édit. orig. : 1963)

Spaemann, R. (1996). Téléologie de la nature et action humaine (trad P. Destrée et J. Dewitte). *Études phénoménologiques : Phénoménologie et philosophie de la nature*, 23-24, 43-63.

Uexküll, T. (von) (1953). *Der Mensch und die Natur*. Grundzüge einer Naturphilosophie. Berne : A. Francke.

Uexküll, T. (von) (1966). *La médecine psychosomatique* (trad. R. Laureillard). (Idées). Paris : Gallimard.

Revue des Questions Scientifiques, 2019, 190 (3-4) : 385-403

De la possibilité d'articuler les mathématiques et l'éthique[1]

Françoise Roumieu
Université catholique de Lyon
Faculté de philosophie
francoise-roumieu@orange.fr

Résumé. – Les statistiques permettent des observations fines d'une population et les probabilités permettent de faire des prévisions sur l'avenir toujours incertain. Par ailleurs, la logique des propositions est un modèle de raisonnement parfait. Ces calculs mathématiques sont utilisés dans beaucoup de domaines qui intéressent la vie bonne des hommes, ou plutôt la vie la meilleure possible et, parfois, seulement la moins mauvaise possible. Mais l'amélioration de la vie humaine n'est pas parfaite, et l'imprévu est une réalité qui peut être tragique. Le mal résiste toujours et surprend. Une articulation entre ces deux disciplines que sont les mathématiques et l'éthique est donc à penser avec une mise en dialectique à déployer grâce à un medium à déterminer. Le medium choisi est le langage parlé, qui ne mène pourtant pas toujours à une intercompréhension satisfaisante. Le mal et les insuffisances du langage amènent à préciser un lieu pour l'articulation de ces deux disciplines. Le lieu choisi est le risque selon les points de vue mathématique et éthique. En effet, le risque lié à une situation d'incertitude est parfois mathématiquement calculable. En même temps, le risque est aussi une affaire d'espérance, une espérance de gain qui engage chacun dans le dynamisme de la vie. Ainsi, le jeu et le pari sont considérés comme des modèles possibles pour une discussion éthique entremêlant des points de vue différents.

Abstract. – Statistics allow for astute observations concerning a population, and for probabilities, which permit certain predictions regarding an ever-uncertain future. Moreover, the logic of propositions is a perfect reasoning model. These mathematical calculations are used in many spheres that concern the good life of humankind, or rather the best possible life and, sometimes, only the least undesirable option possible. But the improvement of human life is not perfect, and the unexpected is a reality that can be tragic. Bad persists and appears un-

1. Cet article est issu de la thèse que nous avons soutenue le 12 décembre 2017 à l'Université catholique de Lyon sous la direction de Pierre Gire.

expectedly. A connection between these two disciplines, namely mathematics and ethics, is, therefore, to be considered within a dialectic setting and deployed through a defined medium. The chosen medium is the spoken language, which does not, however, always lead to a satisfactory intercomprehension. Evil and inadequacies of language make it necessary to specify a place for the correlation of these two disciplines. The chosen area is risk according to both mathematical and ethical standpoints. Indeed, the risk associated with an uncertain situation is sometimes mathematically calculable. At the same time, risk is also a matter of hope, an expectation of gain that engages everyone in the dynamism of life. Thus, gambling and betting are seen as possible models for an ethical discussion that intertwines different points of view.

Mots-clés. – Pari — Pascal, Blaise — Probabilités — Vraisemblable — Wittgenstein, Ludwig.

Plan de l'article

1. Introduction

Chacun constate que les chiffres sont omniprésents dans notre société : taux de chômage, dette publique, indice des prix, PIB, PNB, classement PISA concernant le niveau de connaissance des jeunes, etc. De ces chiffres se déduisent des constats puis des décisions politiques qui visent à améliorer la vie des hommes de la société concernée. La réflexion s'impose autour de ce qu'il est possible de réaliser. Dans le meilleur des mondes possibles, Leibniz, en 1703, montre que l'homme est libre d'agir, même si ce monde est choisi par Dieu avec les trois principes bien connus que sont le principe de non-contradiction, le principe de raison suffisante et le principe d'harmonie préétablie. Leibniz, mathématicien, nous met sur la voie de notre réflexion lorsqu'il écrit : « l'opinion fondée dans le vraisemblable mérite peut-être aussi le nom de connaissance [...] et je ne sais si l'art d'estimer les vérisimilitudes ne serait plus

utile qu'une bonne partie de nos connaissances » (Leibniz, 1703/1990, pp. 293-294).

À cette époque, le calcul mathématique des probabilités le plus avancé est celui de Pascal en 1654 avec la résolution du problème des partis. Mais la théorie des probabilités n'est fondée mathématiquement qu'en 1930 par Kolmogorov. Mathématiser l'incertitude concernant une situation présente ou à venir devient alors possible, et il est de nos jours souvent possible d'estimer et d'évaluer ce qui est vraisemblable. Une réponse mathématique est ainsi donnée à Leibniz.

De plus, Leibniz avait l'idée de créer une « caractéristique » qui permettrait de tout dire sous la forme logique de propositions vraies ou fausses avec une algèbre articulant ces propositions entre elles. C'est cette idée qui a inspiré Russell au début du XXe siècle pour la mise en place de la logique moderne des propositions.

Du fait que beaucoup de décisions concernant la vie des hommes sont prises à partir d'observations chiffrées, que l'estimation du vraisemblable peut s'envisager et enfin que l'éthique présente souvent une argumentation logique, il est légitime d'examiner l'hypothèse qu'une articulation entre les mathématiques et l'éthique est possible.

2. Les performances des mathématiques

2.1. Du côté des statistiques et des probabilités

Une première façon d'appréhender le monde qui nous entoure est de l'observer, de recueillir des données concernant un domaine qui suscite l'intérêt. Aristote, voulant observer la nature, demande à ses esclaves de ramasser des plantes pour les comparer. De là, il pense déterminer des caractères communs à certaines plantes et envisager, par comparaison, une classification. Au plan politique, il compare les différents régimes de plusieurs villes grecques en vue de déterminer si l'un est meilleur que d'autres : c'est une façon rationnelle d'établir un jugement. Ce type d'étude s'est toujours fait, et se pratique de plus en plus parce que les ordinateurs mettent à disposition des milliards de données dans tous les domaines : l'agriculture, la médecine, la biologie, la démographie, et même la sociologie ou la psychologie. De plus, les techniques calculatoires et les principes généraux de l'étude d'une série de données, qualitatives ou quan-

titatives, se sont affinés dans l'histoire au fur et à mesure des progrès des mathématiques.

D'autres types d'observations et de calculs permettent des inférences. L'inférence statistique consiste à induire des caractéristiques inconnues pour une population à partir d'un échantillon issu de cette population. Les caractéristiques de l'échantillon, une fois recueillies et connues, reflètent avec une certaine marge d'erreur celles de la population. Cependant, il faut toujours garder en tête que les conclusions pour toute la population sont obtenues seulement de façon probable, et l'erreur est toujours calculée et donnée. Tous les sondages d'opinion, les prévisions des résultats d'élections sont issus des statistiques inférentielles et s'avèrent justes avec tel ou tel pourcentage d'erreur.

Les résultats ainsi obtenus remplacent très avantageusement des adverbes comme beaucoup, très peu, presque, pas trop, rarement. Le nombre rend compte d'une situation existante de façon claire et simple. Il permet des représentations graphiques très commodes, qu'elles soient sous forme d'histogrammes, de secteurs angulaires ou autres. Peu importe, de telles représentations sont bien plus expressives que des discours compliqués, et donnent lieu facilement à des comparaisons. De telles statistiques donnent une description d'un état de fait et aboutissent à l'établissement de lois pour certains phénomènes observés, ou bien à une modélisation théorique des observations réalisées.

Des courbes sont construites à partir de là et peuvent être proches de courbes connues, comme une droite, une courbe de Gauss, une courbe exponentielle ou autre. Ces courbes d'ajustement autorisent des prédictions : des résultats certains obtenus à partir de ces études se déduisent des résultats incertains et probables dans l'avenir. Ce qui est obtenu est seulement une possibilité, une anticipation, non pas une connaissance certaine.

Les probabilités disent très bien ce qui est impossible comme ce qui est certain. Elles indiquent aussi très clairement ce qui est incertain dans la mesure où elles modélisent le caractère imprévisible des phénomènes. L'imprévu apparaît dans les calculs, à partir desquels il est possible de prendre une décision raisonnable dans une situation présente ou à venir, le problème étant de décider quel risque est acceptable.

L'avenir étant par nature toujours incertain, puisque l'imprévisible peut apparaître ; la question se pose de savoir quel type de connaissance donne un calcul de probabilité. C'est ainsi que certains mathématiciens sont fréquentistes alors que d'autres sont subjectivistes. Pour les premiers, la probabilité

est dans les choses mêmes, c'est-à-dire dans leur nature : l'obtenir à partir des fréquences est donc une démarche objective. Pour les seconds, la probabilité est liée au mathématicien qui la calcule, et ne dépend que de lui, voire même que de ses croyances. Les subjectivistes pensent que la probabilité n'est rien d'autre qu'une sorte de degré de croyance étayée et confortée par un calcul mathématique. Il n'empêche que les prévisions obtenues à la suite de tels calculs se réalisent effectivement particulièrement souvent. Il est ainsi légitime d'utiliser de telles mathématiques pour prendre des décisions intéressant la vie humaine.

Quelle que soit la conception que l'on ait des probabilités, il est remarquable qu'elles ont une aptitude exceptionnelle à permettre des conjectures réalistes concernant l'impossible, le certain, le presque certain accompagnées d'un reste inconnu, mais mesuré et donné par les calculs. C'est en ce sens que les mathématiques sont performantes.

2.2. Deux exemples

L'exemple des conditions à choisir concernant la construction des barrages est très éclairant pour bien comprendre ce que sont les statistiques et ce que sont les probabilités. Les statistiques concernent le passé connu alors que les probabilités concernent l'avenir inconnu. L'éthique accepte que la construction d'un barrage soit réalisée à condition qu'elle ne mette pas en péril la vie des habitants de son voisinage. Un tremblement de terre, une crue importante, une construction trop légère peuvent provoquer la rupture de ce futur barrage et occasionner des dégâts matériels et humains considérables.

Comment faire ? Des recherches sont menées dans les chroniques qui relatent les incidents naturels les plus spectaculaires. Ces observations, consignées depuis longtemps dans les archives, sont à l'origine de statistiques qui permettent de connaître la fréquence avec laquelle ces incidents sont apparus. Les crues sont classées selon le débit de la rivière mesuré en m^3/s selon qu'elles se sont produites tous les ans, tous les dix ans, tous les cent ans. Les modèles mathématiques établis à partir de ces statistiques permettent des prospectives, c'est-à-dire de déterminer avec quelle probabilité telle crue peut se produire. Le langage est très important :

1. La crue centenaire, donnée par les statistiques, est la plus importante qui s'est effectivement produite au cours des cent dernières années.

2. La crue centennale, donnée par le modèle probabiliste construit sur les statistiques, est d'importance proche, et a une chance sur cent de se produire dans l'année à venir.

Ces savants calculs mathématiques, mêlés à ceux de la résistance des matériaux de construction, aident à la décision par rapport au risque encouru. « Quel risque est acceptable ? » est la question éthique par excellence avant d'envisager la construction. La réponse est claire : les barrages sont construits de telle sorte qu'ils peuvent résister à une crue décamillénale. Cela signifie que, chaque année, il y a une chance sur dix-mille que cette crue décamillénale se produise, et que le barrage ainsi construit lui résistera. Grande est l'impression de sécurité, même s'il reste toujours un risque de rupture. En effet, il se peut qu'un jour, de date inconnue, ait lieu une crue tout à fait rare, inattendue et encore jamais vue qui cause la rupture du barrage et une catastrophe humaine terrible. Construire un barrage, c'est prendre ce risque, bien sûr, mais ce risque est raisonnable et calculé. Il serait inutile de construire un barrage résistant par exemple à un tremblement de terre qui détruirait tout aux alentours sauf lui.

Les calculs montrent justement très bien que les risques ne sont jamais nuls. L'imprévisible, et donc l'imprévu, existent, et l'homme est obligé de vivre avec cette idée.

Un deuxième exemple est celui de Galton exposé par Alain Desrosières (2000). Galton, cousin de Darwin, réfléchit, dans les années 1870-1880 aux conséquences politiques du principe darwinien de sélection naturelle appliqué aux maladies mentales et au dérèglement moral liés selon lui à la pauvreté. Il remarque que les pauvres, c'est-à-dire les plus inaptes ont beaucoup plus d'enfants que les individus des classes sociales aisées et cultivées. En conséquence, l'Angleterre ne peut que décliner si les choses continuent ainsi. Cette idée est perçue par beaucoup comme « un élément du progrès de la science contre l'obscurité et l'ignorance » (Desrosières, 2000, p. 159). Galton est parti de ce point de vue et a interprété ses observations de façon très libre, en particulier lorsqu'il considère que la « valeur civique » et la « valeur génétique » d'un individu sont une seule et même valeur. Ce jugement n'est pas scientifique du tout. En effet, Galton posant cette hypothèse réussit à conclure que ces deux valeurs sont identiques parce qu'il rapporte toutes ses observations à l'hérédité sans jamais s'interroger sur d'autres facteurs comme les conditions de vie, l'éducation ou la qualité de l'enseignement dispensé à l'école. Les observations et les calculs de Galton sont justes, mais incomplets, insuffisants et surtout orientés de telle sorte qu'ils prouvent ce qu'il a décidé a priori de prouver. Galton, voulant absolument démontrer que les tares et les imperfections des enfants sont uniquement héréditaires, réussit son entreprise parce qu'il étudie seulement ce qui peut le conforter dans une conclusion en fait décidée a priori. L'éthique précède ici largement les mathématiques que Galton a fait évoluer

en particulier en créant de nouveaux calculs statistiques encore utilisés de nos jours, comme le coefficient de corrélation entre deux séries statistiques qui mesure la force du lien entre elles. L'eugénisme héréditariste débute ainsi avec les abus connus comme la stérilisation forcée aux États-Unis des malades mentaux au début du XXe siècle, le regroupement d'Aryens en vue de la reproduction des meilleurs sous l'Allemagne nazie par exemple. L'eugénisme a mené à des horreurs absolument inacceptables que Galton n'a jamais imaginées à ce point.

Dans le premier exemple, les mathématiques permettent d'éclairer la décision à prendre quant à la construction du barrage assortie d'exigences raisonnables concernant sa résistance aux crues. Dans le second exemple, les mathématiques servent plutôt d'habillage scientifique d'une intuition que Galton a par avance en appliquant a priori les théories de son cousin Darwin à la société anglaise dans laquelle il vit.

2.3. Condorcet, les mathématiques et la justice

Condorcet (1785) analyse l'exemple d'un jugement criminel donné à Rome où l'on peut voter le *non liquet*, c'est-à-dire dans une situation où la chose n'est pas claire et où le doute est tel qu'il est impossible de conclure sur la culpabilité ou non de l'accusé[2].

2. La délibération a lieu dans ce cas entre les trois avis suivants : 1er avis : il est prouvé que l'accusé est coupable ; 2e avis : il est prouvé que l'accusé est innocent ; 3e avis : ni l'un ni l'autre n'est suffisamment prouvé. Pour lui, il y a deux systèmes de propositions contradictoires concernant l'accusé pour qui les jurés doivent se prononcer sur sa culpabilité :
Le premier système : - (A) : il est prouvé que l'accusé est coupable.
- (N) : il n'est pas prouvé qu'il soit coupable.
Le deuxième système : - (a) : il est prouvé qu'il est innocent.
- (n) : il n'est pas prouvé qu'il soit innocent.
Après l'examen de toutes les combinaisons possibles de ces propositions, dont certaines sont contradictoires et donc impossibles, Condorcet examine le cas où le vote des jurés s'est réparti de la façon suivante :
11 ont voté pour le 1er avis : il est prouvé que l'accusé est coupable ; 7 ont voté pour le 2e avis : il est prouvé qu'il est innocent ; enfin 6 ont voté pour le 3e avis : il n'est prouvé ni l'un ni l'autre. Si la décision se fait à la pluralité des voix, il est prouvé que l'accusé est coupable. Or, les voix peuvent être comptées autrement en considérant les quatre propositions possibles concernant l'accusé :
- Nombre de voix pour la proposition A : 11 (les votants du 1er avis).
- Nombre de voix pour la proposition N : 7 + 6 = 13 (les votants des 2e et 3e avis).
- Nombre de voix pour la proposition a : 7 (les votants du 2e avis).
- Nombre de voix pour la proposition n : 11 + 6 = 17 (les votants des 1er et 3e avis).

Cet exemple montre comment la logique des propositions et la façon de calculer les voix peuvent induire des décisions très différentes. Ces considérations sont reprises ultérieurement par Arrow (1974) qui montre très clairement que les préférences individuelles ne suffisent pas pour décider des préférences collectives.

En conclusion, les mathématiques peuvent être d'un soutien précieux pour l'éthique. Elles peuvent proposer des calculs permettant de mesurer les risques encourus selon l'action envisagée. Elles peuvent aussi, en examinant certains calculs, interpeller l'éthique et lui imposer une réflexion critique autour des principes qu'elle souhaite honorer. Enfin, tenter de justifier certaines décisions de nature éthique à l'aide de propositions logiques peut permettre de dégager plus clairement ces principes et de voir plus clairement les problèmes posés par les choix opérés.

3. Les limites des mathématiques

3.1. La persistance du mal

Ci-dessus, les exemples choisis visent la vie bonne pour les hommes, en tous les cas la vie la meilleure possible pour la collectivité et l'individu placé dans cette communauté. Pourtant, le mal est loin d'être éradiqué, même s'il est limité en certaines situations.

Les mathématiques et l'éthique se nouent assez bien sous l'hypothèse que les mathématiques permettent à l'éthique de prendre conscience d'elle-même et que l'éthique permet aux mathématiques de créer de nouveaux outils comme de réfléchir et de critiquer ses propres pratiques. Cependant, il est un point où le nœud entre ces deux disciplines se défait au lieu de se resserrer, c'est au niveau du mal qui amène l'homme à prendre des responsabilités afin d'envisager, sinon son éradication, du moins sa limitation. Autrement dit, il y aurait une façon rationnelle de concevoir l'éthique et une autre façon qui tiendrait davantage compte des souffrances humaines individuelles. La première conception, surtout si elle se contente d'envisager le tout, s'accorde assez bien avec les mathématiques. La seconde conception, faisant droit aux cas singuliers, s'en accommode plus mal. Ce qui est en jeu concerne l'affrontement entre le ration-

Il y a donc 17 personnes qui pensent qu'il n'est pas prouvé que l'accusé soit innocent. Ces 17 personnes ne peuvent choisir que le 3e avis. Les décisions rendues à la pluralité des voix ne sont donc pas les mêmes pour l'accusé selon la façon dont les voix sont comptées.

nel, dont la mathématique est le modèle parfait, et le raisonnable, que l'éthique met en œuvre devant des souffrances humaines.

3.2. Le rationnel et le raisonnable

Elster (2010) clarifie et précise sous la forme de schémas les liens entre les désirs (qui sont ici les préférences), les croyances et les informations pris en compte avant une action individuelle en repérant trois types de choix : le choix rationnel, le choix adaptatif et le choix émotionnel[3].

La part d'irrationnel entre en jeu dans les seuls choix adaptatif et émotionnel. Elster montre que ces choix peuvent être tout à fait raisonnables. En tous les cas, si le raisonnable est de la nature du juste milieu entre l'excès et le défaut à la manière d'Aristote, il n'est pas toujours le résultat d'une délibération rationnelle parce que le juste milieu est difficile à trouver.

> « [...] l'état moyen dont on peut faire la louange est celui qui nous pousse à la colère contre ceux qu'on doit, pour les motifs qu'on doit, de la manière qu'on doit et qui satisfait à toutes les exigences semblables, tandis que les excès et les défauts sont susceptibles de blâme, un blâme léger si les écarts sont faibles et un blâme plus sérieux s'ils sont plus grands. » (Aristote, trad. 2004, p. 211).

La colère suscite des réactions et des devoirs bien qu'elle ne soit pas toujours rationnelle. L'éthique ne peut pas faire l'économie du désir des uns et des autres de s'engager dans « la visée de la vie bonne avec et pour autrui dans des insti-

3. Le choix rationnel : l'acteur choisit de façon optimale l'action à mener, qui sera rationnelle lorsqu'il réalise une adéquation parfaite entre ses désirs (ou préférences) et ses croyances selon les informations dont il dispose. Le regard sur la situation concrète reste froid.
Le choix adaptatif : les désirs de l'acteur sont les causes des informations recherchées, sans aucune recherche d'optimisation. En ce cas, l'action décidée est la cause des préférences et non les préférences la cause de l'action choisie. Cette fois, l'agent recherche une adéquation entre ses désirs, ses informations et ses croyances. Mais l'information est tronquée dès lors que l'adéquation entre désirs et croyances lui semble réalisée. L'agent a optimisé le plaisir de croire que ses désirs sont réalisés après les avoir adaptés au monde. L'action choisie lui semble alors la meilleure, bien qu'il puisse prendre ses désirs pour la réalité et être dans l'illusion d'une réussite qui ne sera pas toujours concrètement au rendez-vous. L'agent ne réussit pas un regard froid sur la situation.
Le choix émotionnel : les émotions provoquent certains désirs, et même certaines croyances qui peuvent être totalement fausses. Elles peuvent être aussi la cause directe de certaines actions urgentes, spontanées et parfaitement bien menées avec des conséquences fastes ou non.

tutions justes » (Ricœur, 1990, p. 202). Et ce désir n'est pas de l'ordre d'une rationalité froide sans aucune adaptation sociale et sans aucune émotion.

3.3. Logique et éthique

L'éthique rêve de présenter une argumentation en faveur de certaines actions sous la forme d'une démonstration, parce que la démonstration mathématique est parfaite, indiscutable, juste ou fausse. La question qui se pose ici est de savoir si un discours présenté sous la forme de propositions logiques pour justifier une action assure la bonté de cette action.

L'exemple de la justification des génocides est éclairant dès lors que le raisonnement est présenté de la façon suivante : « tel groupe de personnes est nuisible pour notre groupe » implique « l'obligation d'exterminer ce groupe qui nuit à nos intérêts ». C'est d'une logique implacable au plan formel.

En 1781, Kant distingue clairement, et oppose, la logique générale et la logique transcendantale. La logique générale « fait abstraction [...] de tout contenu de la connaissance, c'est-à-dire de toute relation de celle-ci à l'objet, et elle considère uniquement la forme logique dans la relation que les connaissances entretiennent entre elles, c'est-à-dire la forme de la pensée en général » (Kant, 1781/2006, p. 146). En distinguant la pensée pure et la pensée empirique, Kant conclut qu'il existe une logique transcendantale « où l'on ne fait pas abstraction de tout contenu de la connaissance [...]. Elle irait aussi à la recherche de l'origine de nos connaissances des objets, dans la mesure où une telle origine ne peut être assignée aux objets » (Kant, 1781/2006, p. 146).

La logique transcendantale permet de rechercher les conditions de possibilité des représentations que nous avons des choses a priori, sans toutefois pouvoir atteindre leur sens ultime.

En conséquence, « tel groupe de personnes est nuisible pour notre groupe » est une affirmation dont il est nécessaire d'interroger l'origine. Ce n'est peut-être qu'une représentation a priori à partir de laquelle est construit un discours calqué sur la logique générale dont les prémisses et les conclusions a posteriori ne sont pas passées au crible de leur vérité. Dans ce cas, on peut soupçonner que l'action soit en réalité décidée avant le raisonnement qui se veut percutant.

La logique d'un discours ne relève pas toujours d'une logique mathématique d'enchaînements de propositions dont on peut dire qu'elles sont vraies

ou fausses[4]. En particulier, la conclusion de l'exemple choisi, n'est pas une proposition dont on peut dire qu'elle est vraie ou fausse parce qu'une obligation peut toujours être transgressée. Ce discours ne relève pas, malgré ses apparences de la logique mathématique des propositions.

Retenons de ce paragraphe qu'une présentation qui semble logique au plan formel n'assure pas que l'action choisie soit bonne.

4. De l'importance du langage et de ses limites

4.1. Des mathématiques à l'éthique ou l'inverse ?

Ce qui précède montre des difficultés à passer directement des mathématiques à l'éthique.

Il y a donc lieu de penser un medium qui puisse soutenir une articulation entre ces deux disciplines. Le medium choisi est le langage qui a déjà été évoqué à propos de discours éthiques imitant la logique mathématique. Dans ce sens, ce sont les mathématiques qui apportent leur contribution à l'éthique.

Mais quelle contribution l'éthique peut-elle apporter aux mathématiques ? Nous avons vu que Galton, pour prouver mathématiquement que l'hérédité est la cause d'un dérèglement moral, crée le coefficient de corrélation entre deux séries statistiques et de nouvelles façons d'étudier des séries d'observations. L'éthique doit faire prendre conscience aux mathématiques de ce qu'elles calculent vraiment. Dans cet exemple, il est important de voir qu'un bon coefficient de corrélation n'est pas la même chose qu'une relation de cause à effet. En particulier toutes les données stockées à propos de tout et de tout le monde avec les Big Data rendent possibles beaucoup de rapprochements. Ces rapprochements peuvent être décidés par avance en vue d'une évaluation des comportements de certaines catégories de population jugées a priori indésirables.

Data (2009), pseudonyme d'un collectif de fonctionnaires issus de la statistique et de la recherche publique, dont la plupart sont tenus à l'obligation de réserve, dénonce les « bricolages statistiques ». Ces bricolages concernent les vrais chiffres du chômage, de l'évolution du pouvoir d'achat, de l'évolution de la délinquance et de bien d'autres études. Quelles que soient les méthodes de

4. La logique déontique est une écriture des problèmes éthiques concernant les obligations, les permissions, l'existentiel et l'universel sous la forme d'une logique mathématique et montre très bien, avec ses paradoxes, et ses contradictions, ses propres limites.

calcul, elles ne donnent pas les preuves irréfutables que l'action gouvernementale décidée est effectivement la meilleure. Les méthodes de calcul peuvent être choisies de façon différente entre une situation constatée avant l'action gouvernementale et une situation constatée après l'action gouvernementale. Dans ce cas, un monde avant et un monde après étant décrits avec des outils différents ne sont plus comparables. Il y a tout un jeu autour du réel décrit avec des outils et un langage différents, ce qui oriente vers une certaine représentation du monde qui peut effectivement être une illusion.

En 1843, Cournot (1984) ne conçoit pas les choses de manière trop scientiste et objectiviste, et distingue les probabilités objectives des probabilités subjectives. Il insiste fortement sur le caractère ambigu, du calcul des probabilités qui, d'une part, peut prendre appui (mais pas toujours) sur des fréquences observées et qui, d'autre part, quantifie ce qui n'est au fond que des raisons de croire. Les probabilités objectives, lorsqu'elles s'appuient sur des fréquences observées, donnent une mesure de la possibilité des choses. En revanche, les probabilités subjectives sont données par des modèles mathématiques qui dépendent du choix du mathématicien, mais aussi des données et des connaissances à sa disposition.

De là, il vient que l'interprétation des tableaux statistiques ou des calculs de probabilité peut être fallacieuse et viser à justifier telle action plutôt que telle autre, ce dont les mathématiciens n'ont pas toujours conscience.

Le langage mathématique est un langage formel précis, c'est une langue étrangère sauf pour les mathématiciens. Le langage exposant des problèmes éthiques est une langue parlée inscrite dans la vie quotidienne de tous. La voie entre une langue mathématique et une langue parlée qui rend compte des difficultés morales d'une société amenée à choisir telle ou telle action est étroite. Un lien depuis les statistiques, les probabilités et la logique vers l'éthique se fait en traduisant ce langage mathématique, c'est-à-dire en interprétant, en discutant, voire en contestant les résultats obtenus ou en complétant ces résultats par d'autres études mathématiques. C'est exactement ce que met en place l'ONU lorsqu'elle conseille les pays en voie de développement à propos de la santé ou de l'éducation.

La population doit avoir un niveau mathématique suffisant pour comprendre l'interprétation des chiffres qui lui sont donnés parce qu'elle peut être utilisée pour justifier certains choix discutables du point de vue de l'éthique.

Lorsque le mathématicien est convoqué pour une étude précise par un décideur qui a besoin d'un éclairage sur un point, ses calculs sont toujours par-

faitement justes. La question est de savoir comment les résultats peuvent être interprétés et quelles décisions peuvent suivre. Toutes les conséquences ne sont pas prévisibles, mais les décisions prises doivent à nouveau être examinées selon l'éthique. En particulier, la question se pose de savoir si toutes les études ont été envisagées et si d'autres études ne pourraient pas invalider les précédentes. Une articulation entre les mathématiques et l'éthique ne peut se penser qu'en mode allers et retours. Les calculs étant toujours incomplets ne peuvent pas à eux seuls justifier les décisions dont la responsabilité incombe à toute la communauté humaine concernée. Les mathématiques sont un élément à prendre en compte pour différentes décisions, mais un élément parmi d'autres tout aussi importants comme la civilisation et la culture de cette communauté par exemple.

4.2. La discussion

Habermas (1999) cherche à fonder une morale qui concilie les éthiques personnelles et particulières, de telle manière qu'elles ne soient pas incompatibles et indépendantes les unes des autres, mais acceptées par tous universellement à l'aide d'une discussion pratique. L'enjeu est de pouvoir estimer la valeur de vérité ou de justesse d'un jugement moral pour sortir d'une morale subjectiviste et relative qui mène au scepticisme, tout en tenant compte des intérêts et des préférences de tout un chacun. À cette fin, Habermas renverse la formulation de l'impératif catégorique kantien :

> « Au lieu d'imposer à tous les autres une maxime dont je veux qu'elle soit une loi universelle, je dois soumettre ma maxime à tous les autres afin d'examiner par la discussion sa prétention à l'universalité. Ainsi s'opère un glissement : le centre de gravité ne réside plus dans ce que chacun peut souhaiter faire valoir, sans être contredit, comme étant une loi universelle, mais dans ce que tous peuvent unanimement reconnaître comme une norme universelle » (Habermas, 1999, pp. 88-89).

Les limites du langage apparaissent de suite parce qu'il n'est jamais certain que les participants se soient bien compris. De plus, il existe de l'indicible, au moins lorsque l'homme est devant les tragédies de l'existence. Wittgenstein réfléchit au langage ordinaire et au langage logique qui peuvent être posés sur le monde. Il précise lui-même qu'il vise à réhabiliter le silence, celui de l'indicible par exemple, face au langage clair, celui de la science par exemple. « Tout ce qui peut être dit peut être dit clairement, et sur ce dont on ne peut pas parler, il faut garder le silence » (Wittgenstein, 1921/2001, p. 31). Tous les problèmes

éthiques ne peuvent pas être décrits sous forme d'enchaînements de propositions logiques, ce qui n'empêche pas les débats. Les difficultés à mettre en mots l'indicible justifient la grande diversité d'expression du mal et du bien liés à la vie humaine : la littérature, la poésie, le cinéma et les témoignages divers et variés qui se disent entre les uns et les autres par exemple. Justement on ne garde pas le silence, on témoigne de ses souffrances ou de ses joies dans des expressions plurielles et diverses, qui ne sont justement pas des propositions logiques. Wittgenstein ne dit pas de se taire et ne récuse pas la nécessité d'agir en justifiant ses actes d'une façon ou d'une autre. Il a même « toujours pensé qu'un ouvrage, quel qu'il soit, un roman ou une nouvelle, par exemple, pouvait avoir, en dehors de tout enseignement ou théorisation morale, un objectif moral susceptible de nous aider à nous atteler aux tâches de la vie dans l'esprit requis » (Wittgenstein, 1929/2008, p. 12). L'éthique n'est pas une science parce que son langage n'est pas la mathématique. Elle n'est pas issue d'un langage logique parce qu'un tel langage est pertinent pour des faits, et seulement pour des faits.

Un jeu de langage donné constitue un système autonome formé par un ensemble de termes accompagnés de tous leurs usages possibles, ce qui donne les règles du jeu. En ce sens, la mathématique est un jeu de langage et l'éthique un autre jeu de langage. Du coup, se représenter un certain langage est « une activité ou une forme de vie » (Wittgenstein, 1949/2004, p. 28). L'éthique s'inscrit de cette façon dans le dynamisme de la vie à laquelle chacun est amené à donner un sens.

Devant les limites de l'usage des mathématiques en éthique et celles du langage qui pourrait être un medium entre les deux disciplines, il est important de déterminer un lieu où elles se croisent dans le concret de la vie. Ce lieu est du côté du risque, qui peut, parfois, être évalué au mieux avec l'aide des mathématiques. L'éthique s'inscrit de cette façon dans le dynamisme de la vie à laquelle chacun est amené à donner un sens au plan personnel comme au plan collectif. La prise de décision comporte un risque : celui de perdre, mais aussi celui de gagner, comme dans les jeux, parce qu'une situation éthiquement compliquée engendre une réaction. Le risque donne à la vie son intérêt et son dynamisme. Au fond, la vie amène à prendre des risques, avec l'espoir de gagner plutôt que de perdre, ce qui est de l'ordre du jeu et du pari.

5. Un modèle pour une articulation entre éthique et mathématique : le jeu et le pari

Pour faire dialoguer les mathématiques et l'éthique, on peut imaginer que les personnes amenées à discuter avant de prendre des décisions intéressant la vie des hommes sont des joueurs dont les avis vont s'imbriquer selon leur raison, mais aussi selon leurs affects. Pascal, en 1654, a élaboré une solution au calcul des partis qui permet le partage des sommes d'argent misées entre des joueurs avant que le jeu ait pu déterminer un gagnant. Le calcul est un calcul par récurrence qui tient compte des parties non jouées susceptibles d'être gagnées ou perdues pour emporter la totalité de la mise. Ce calcul tient compte des affects de celui qui est le plus proche de gagner le jeu afin qu'il puisse convaincre l'autre joueur que le calcul ainsi réalisé est le plus équitable. C'est un premier exemple de théorie des jeux, dont le modèle actuel bien connu est celui du dilemme du prisonnier. Justement, ce ne sont pas les seuls calculs qui importent, mais aussi l'enjeu affectif de ce qui se passe entre les joueurs.

Pascal, traditionnellement considéré comme étant à l'origine du calcul des probabilités à cause de son intérêt pour les jeux, est aussi très célèbre pour son fameux pari, exposé en 1669, plus tard que les calculs précédents.

Cléro (2011, p. 210) va jusqu'à envisager « le schème argumentatif du pari comme modèle de discussion éthique ».

Ce qui est important est la structure argumentative et même la structure démonstrative du texte du pari de Pascal et non pas l'apologie du christianisme. Pascal n'a pas une grande confiance en l'être humain fragile, versatile et tiraillé par le doute. La façon dont Pascal mène son argumentation peut servir de modèle pour une discussion éthique parce qu'il construit une discussion entre un orateur et un interlocuteur qui n'ont pas le même avis sur la nécessité de parier sur l'existence de Dieu. L'argument central porte sur l'espérance. L'espérance de gain pour des paris avec une mise d'argent se calcule mathématiquement de la façon suivante :

(Probabilité de gagner) x (Montant gagné par pari) – (Probabilité de perdre) x (Montant perdu par pari).

L'interlocuteur considère que le plus simple est de ne pas choisir entre Dieu existe/Dieu n'existe pas.

Le tour de force de Pascal est de lui répondre : « Il faut parier. Cela n'est pas volontaire, vous êtes embarqué » (Pascal, édit. 2003, p. 81).

Le basculement entre une argumentation éthique et une démonstration mathématique intervient de suite après lorsque Pascal annonce « si vous gagnez, vous gagnez tout ; si vous perdez, vous ne perdez rien. Gagez donc qu'il [Dieu] est, sans hésiter ! » (Pascal, édit. 2003, p. 81). Le gain est une vie, ou plusieurs vies alors qu'il n'y a pas de perte. En fait, en acceptant l'idée de l'existence de Dieu, le gain est infini dès qu'il est mesuré par rapport à la vie singulière qui est finie. Cet acte de foi est une décision concernant sa propre existence finie, laquelle place chacun dans le rapport qu'il peut avoir avec l'infini non borné et inconnu. Cléro (2011) voit les échanges des deux protagonistes comme un « mouvement hélicoïdal », parce que le débat est relancé de manière incessante du côté de l'objet duquel il est question. Les sujets sont instables, s'affrontent, on ne voit pas clairement où les controverses commencent et encore moins où elles vont s'arrêter tant les discours des deux joueurs, ici un orateur dominant et un interlocuteur, sont imbriqués.

La très belle réponse de Pascal met en jeu l'essence même du hasard. Il établit une « commensurabilité, non pas entre la certitude d'avoir gagné une fois qu'on a gagné, et celle d'avoir perdu une fois qu'on sait qu'on a perdu ; mais entre des fractions de certitude de gagner et des fractions de certitude de perdre dont le rapport s'égalise avec celui du gain et de l'enjeu quand rien n'est décidé ni même décidable » (Cléro, 2011, p. 217).

La force du raisonnement de Pascal est de mêler à la fois les calculs mathématiques et les passions des joueurs qui échangent leurs points de vue en situation d'incertitude et de risque, ce qui est le cas de personnes qui doivent prendre une décision dans le domaine éthique.

6. Conclusion

De nos jours, les progrès des mathématiques dans les domaines du recueil des données et du calcul des probabilités permettent de s'approcher de ce qui est le plus probable et, donc, le plus vraisemblable. Cette approche, même si elle ne donne pas l'entière vérité, donne la possibilité de prendre les décisions qui ont le plus de chance d'être couronnées de succès, ce qui est déjà beaucoup. Cette position conduit à prendre conscience que la vie se construit modestement avec des actes évalués selon leurs conséquences les plus vraisemblables, les moins catastrophiques et, sans doute, les meilleures au moins provisoirement.

Mathématique et éthique se nouent ainsi autour d'une même essence qui est le risque, le risque d'échec ou de succès, le risque de fausseté ou de vérité

dans un jeu infini d'allers-retours. Chacun parmi les autres est « embarqué », joue et parie sur le meilleur, peut-être seulement sur le moins mauvais. Beaucoup de modestie s'impose concernant ces deux disciplines qui pourraient prétendre connaître la vérité là où elles doivent se contenter du probable et du vraisemblable. Ce qui reste inconnu oblige l'éthique à être une tâche infinie et jamais terminée, ainsi inscrite dans le dynamisme de l'existence de chacun parmi les autres. Dans cette tâche, l'éthique se structure grâce aux mathématiques dans une dialectique sans fin, entre les principes qui dirigent l'existence et les réalités de la vie qui, parfois, remettent en question ces principes, surtout s'ils sont inadéquats à certaines situations.

Le langage est un medium nécessaire pour la possibilité d'une articulation entre mathématique et éthique, mais il n'est pas suffisant. S'il était nécessaire et suffisant, ces deux disciplines seraient enfermées l'une sur l'autre sans prendre en considération ce qui reste au-delà du probable. L'éthique serait repliée sur elle-même et deviendrait un système structuré formé de règles et de consignes pour bien vivre. Démonstration et argumentation seraient alors confondues. Une telle confusion est grave, car elle peut mener à des abominations mises en place par des gens non scrupuleux qui en manipulent d'autres avec des raisonnements parfaits au plan formel, mais faux ou immoraux. Une articulation entre mathématique et éthique se réalise par l'intermédiaire d'un langage pragmatique dont la tâche est de démêler le vrai du faux au-delà de l'opinion et au-delà des désirs de tout un chacun. Il est important de bien se rappeler que du faux on peut déduire n'importe quoi, c'est-à-dire du vrai comme du faux. Dans ce cas, le raisonnement est juste, mais les conclusions tirées de propositions fausses peuvent être totalement immorales.

Les probabilités évaluent, avec une incertitude calculée et donnée, le nombre de chances qu'a un phénomène de se produire. En situation de doute, ces calculs visent à évaluer, pour une action envisagée, la possibilité de son succès et donnent alors des indications précieuses pour la prise de décision. Mais ces calculs donnent aussi la possibilité de l'échec de l'action envisagée. Ils prouvent donc par eux-mêmes qu'il reste une part d'inconnu, c'est-à-dire une part d'imprévu et d'imprévisible, qui transforme nos décisions en pari sur l'avenir et rendent nos vies plus stimulantes puisqu'il y rentre une part de risque et de jeu.

De nos jours, la puissance de calcul des ordinateurs, les progrès de l'informatique et de l'intelligence artificielle permettent d'évaluer les risques que comporte tel ou tel choix. La robotique vise à améliorer la vie de l'homme en le déchargeant de travaux pénibles et à l'assister dans sa vie quotidienne dans

beaucoup de domaines comme la médecine, l'éducation ou la sécurité des personnes âgées ou des enfants par exemple. De plus ces robots vont ressembler de plus en plus aux êtres humains en manifestant des émotions. Mais ce sont des émotions programmées par d'autres êtres humains, ce qui les rend attendues, voire choisies par l'utilisateur de tels robots. Un robot adopté pour assister une personne, même s'il est choisi par la personne elle-même, se comportera de la façon dont il est programmé et donc d'une façon supposée parfaite. En cela il est totalement inhumain parce que tout risque de ne pas s'entendre avec lui est réduit à zéro. Se soumettre à ce robot est la négation d'un dynamisme de la vie, laquelle est ancrée dans ses imperfections avec le risque de ne pas s'entendre avec tel autre humain à qui les mêmes tâches seraient confiées.

Cependant, on ne peut que louer les qualités des systèmes informatiques qui permettent de poser un diagnostic médical pour un patient, à condition que le patient puisse avoir une relation humaine avec un médecin qui explique la situation et le traitement à envisager.

Il s'agit bien ici d'articuler mathématique et éthique dans des allers-retours incessants afin d'accueillir comme une aide précieuse les progrès technologiques à venir en les laissant à leur place technique, l'homme devant rester maître et responsable de ses décisions morales.

L'ultime conclusion est que chacun doit être vigilant et rester très prudent devant tous les raisonnements, devant tous les tableaux de nombres, devant tous les calculs de probabilité, devant toutes les actions éthiques proposées, comme devant toutes les suggestions qui viendraient de l'intelligence artificielle dont l'utilisation est imminente. La possibilité d'une articulation des mathématiques et de l'éthique se place dans un dialogue infini entre ces deux disciplines qui s'examinent l'une et l'autre dans un jeu critique d'approbations et de désapprobations. Le point de jonction de ces deux disciplines se situe autour du risque calculable et calculé qui autorise à considérer le jeu et le pari comme des schèmes possibles pour les discussions concernant l'éthique. Les nouveautés technologiques nous placent dans la situation de rendre cette articulation indispensable.

Bibliographie

Aristote (2004). *Éthique à Nicomaque* (trad. par R. Bodéüs). Paris : Flammarion.

Arrow, K.J. (1974). *Choix collectif et préférences individuelles* (trad. par Tradecom, groupe de traductions économiques de l'université de Montpellier). Paris : Calmann-Lévy.

Cléro, J.P. (2011). *Calcul moral ou comment raisonner en éthique*. Paris : Colin.

Condorcet, N. (1785). *Essai sur l'application de l'analyse à la probabilité des décisions rendues à la pluralité des voix*. Paris : Imprimerie royale.

Cournot, A.A. (1984). *Exposition de la théorie des chances et des probabilités* (Œuvres complètes, tome I). Paris : Vrin.

Data, L. (2009). *Le grand truquage : comment le gouvernement manipule les statistiques*. Paris : Éditions La Découverte.

Desrosières A. (2000), *La politique des grands nombres : histoire de la raison statistique*. Paris : Éditions La Découverte.

Elster, J. (2010). *L'Irrationalité : traité critique de l'homme économique. Tome II*. Paris : Éditions du Seuil.

Habermas, J. (1999). *Morale et communication : conscience morale et activité communicationnelle* (trad. par C. Bouchindhomme). Paris : Flammarion.

Kant, E. (2006). *Critique de la raison pure* (trad. par A. Renaut). Paris : Flammarion.

Leibniz, G.W. (1990). *Nouveaux essais sur l'entendement humain* (chronologie, bibliographie, introduction et notes par J. Brunschwig). Paris : GF-Flammarion.

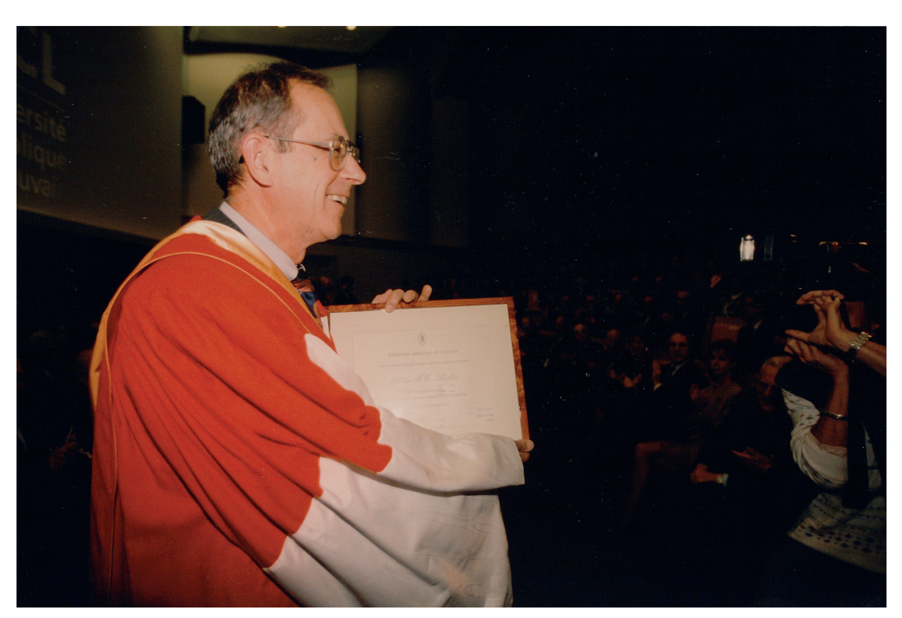
Pascal, B. (2003). *Pensées.* Paris : Pocket.

Ricœur, P. (1990). *Soi-même comme un autre*. Paris : Éditions du Seuil.

Wittgenstein, L. (2001). *Tractatus logico-philosophicus* (trad. par G.G. Granger). Paris : Gallimard.

Wittgenstein, L. (2004). *Recherches philosophiques* (trad. par F. Dastur, M. Élie, J.L. Gautero, D. Janicaud, É. Rigal). Paris : Gallimard.

Wittgenstein, L. (2008). *Conférence sur l'éthique, suivi de notes sur des conversations avec Wittgenstein* (trad. par J. Fauve). Paris : Gallimard.



Philip J. E. Peebles, lauréat du Prix international Georges Lemaître

Source : Archives de l'Université catholique de Louvain (BE A4006 CO 029 0074-2).

Revue des Questions Scientifiques, 2019, 190 (3-4) : 405-407

Actualité

Le Professeur James Peebles

un deuxième lauréat du Prix international Georges Lemaître honoré par le Prix Nobel de physique

Jan Govaerts
Université catholique de Louvain
jan.govaerts@uclouvain.be

Il est de tradition que chaque année les Prix Nobel soient annoncés la deuxième semaine d'octobre, et celui de physique spécifiquement le deuxième mardi de ce dixième mois de l'année, avant la remise officielle de ces Prix le dixième jour du dernier mois de l'année. Ainsi avons-nous appris le mardi 8 octobre 2019 que le Prix Nobel de physique 2019 est attribué à trois Lauréats « *for contributions to our understanding of the evolution of the universe and Earth's place in the cosmos* » parmi lesquels, outre les Professeurs Michel Mayor (Université de Genève) et Didier Queloz (Université de Genève et Université de Cambridge [UK]) « *for the discovery of an exoplanet orbiting a solar-type star* », nous comptons avec plaisir le Professeur James (dit Jim) Peebles de l'Université de Princeton (USA), « *for theoretical discoveries in physical cosmology* »[1].

À l'Université catholique de Louvain (UCLouvain) tout particulièrement, mais aussi plus largement en Belgique, cette annonce fut en effet accueillie avec un réel bonheur car elle honore un grand cosmologiste du XX[e] siècle, et nous en sommes fort heureux certainement d'abord pour Jim Peebles lui-même. Mais cette décision fut reçue également avec une dose certaine de fierté car Jim Peebles peut être compté non seulement parmi la communauté académique de l'UCLouvain et donc celle de Belgique — Jim Peebles apprécie certainement ses visites dans notre pays —, mais également, et ce depuis toujours, comme un grand défenseur, en Amérique de Nord, de l'héritage scientifique de Monseigneur Georges Lemaître pour la cosmologie physique moderne — dont Jim Peebles visita encore en 2014 les Archives à l'UCLou-

1. Cf. https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2019/summary/

vain. En effet, Jim Peebles est non seulement le premier Lauréat, au printemps 1995, du prestigieux Prix international Georges Lemaître attribué depuis cette date tous les deux ans par l'UCLouvain et ses Amis, tandis qu'en 1996 Jim Peebles a par ailleurs été promu Docteur *Honoris causa* de la Faculté des sciences de l'UCLouvain. Et ceci précisément déjà pour ses nombreuses contributions scientifiques fondatrices de la cosmologie physique moderne qui se voient aujourd'hui reconnues par le Prix Nobel de physique.

Avec le Professeur Kip Thorne (California Institute of Technology, USA), récipiendaire du Prix Nobel de physique en octobre 2017 et lauréat du Prix international Georges Lemaître en octobre 2016, Jim Peebles est ainsi le deuxième lauréat du Prix Georges Lemaître à se voir honorer ensuite par l'attribution du Prix Nobel de physique. Une double distinction qui, certainement, est également à l'honneur du Prix international Georges Lemaître remis désormais par la Fondation Louvain de l'UCLouvain.

Poursuivant directement dans la voie tracée par Monseigneur Georges Lemaître, au cours des cinquante dernières années les contributions originales et profondes de Jim Peebles à la cosmologie physique ont enrichi et conduit à la transformation de ce large domaine de recherche fondamentale aujourd'hui, pour l'amener d'un état de conceptualisations et de spéculations théoriques à celui d'une science à part entière s'appuyant directement sur l'observation active de l'univers et totalement soumise à la rigueur intellectuelle et à l'approche critique de la méthodologie scientifique expérimentale. Le paradigme théorique développé par Jim Peebles depuis les années 1960 contribue de manière essentielle au cadre conceptuel contemporain pour la compréhension de l'univers et de son évolution depuis ses débuts.

La théorie du Big Bang décrit l'univers depuis ses tous premiers instants, depuis « cet instant unique, qui n'avait pas d'hier » (Georges Lemaître) il y a près de 14 milliards d'années, alors qu'il était extrêmement dense et chaud. Depuis, l'univers n'a eu de cesse d'être en expansion et de se refroidir, devenant ainsi toujours plus grand et plus froid. À peine environ 400.000 ans après le Big Bang, l'univers devint déjà transparent, et la lumière capable de s'y propager désormais librement pour en atteindre toutes les recoins, y compris nos détecteurs sur Terre, et pénétrer ainsi tout l'espace offert par l'univers. Aujourd'hui, ce rayonnement fossile cosmologique, ou encore fond diffus cosmologique (*Cosmic Microwave Background* ou CMB), est omniprésent tout autour de nous et, encodés dans ses riches propriétés distinctives, il est un précieux messager pour nombre des secrets de l'univers concernant sa structure autant celle d'aujourd'hui que celle de ses débuts. Avec les outils théoriques et les calculs qu'il a développés, Jim Peebles a réussi à interpréter ces premières traces fossiles de la genèse de l'univers et à y découvrir de nouveaux processus physiques d'importance pour sa compréhension aujourd'hui.

Et c'est ainsi que d'une manière totalement inattendue, au cours de ces dernières décennies, les travaux de Jim Peebles avec ces résultats nous révélèrent un univers dont seuls 5 % du contenu en matière et énergie qui participe à son expansion gravitationnelle nous sont connus, à savoir cette matière qui spécifiquement compose les étoiles, les planètes, tout ce que l'on peut trouver sur Terre, et finalement nous-mêmes. Le solde de ce que nous savons devoir en outre composer encore l'univers en matière et énergie, soit 95 % de son contenu,

nous reste toujours totalement inconnu, et est désigné, à défaut de mieux, comme étant de la matière sombre et de l'énergie noire (*dark matter* et *dark energy*[2]).

Comme le dit Jim Peebles dans son interview avec le Comité du Prix Nobel[3] , son aventure scientifique est certainement comparable à celle d'un explorateur de l'univers qui, dans ses pérégrinations cosmologiques, découvre des secrets — dignes d'un Prix Georges Lemaître et du Prix Nobel de physique — ainsi que bien des mystères encore concernant notre univers. Comme le sont en effet ceux de la matière sombre et de l'énergie noire dont l'existence incontestable constitue aujourd'hui l'un des défis majeurs pour la physique moderne du XXIe siècle. Et comment Jim Peebles rêve-t-il de la résolution de cette énigme cosmologique et astrophysique qu'il a lui-même activement contribué à se laisser dévoiler par Dame Nature ?

« *One of the wonderful things about this exploration is that of course we don't know what we will see. And it is true here. I hope that we will be surprised by what is found to be the nature of the dark matter. It might be something that has already been considered seriously. If so, the demonstration will be a detection, perhaps in the laboratory. There are remarkably sensitive experiments now hoping to detect the interaction of dark matter with ordinary matter. It might be through its annihilation that releases energy that can be detected as radiation. But my romantic dream – I guess I am romantic about these things – my romantic dream is that we will be surprised yet once again. I'm hoping that will be the case.* »

2. Cf. https://physicsworld.com/a/exoplanet-researchers-welcome-cataclysmic-nobel-prize-announcement/
3. Cf. https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2019/peebles/interview/

Analyse critique

Quel sens donner à la mécanique quantique ?

Une perspective physique, philosophique et historique guidée par la théorie de de Broglie-Bohm

Yves Caudano
Département de physique
Université de Namur
Rue de Bruxelles, 61
B – 5000 Namur
yves.caudano@unamur.be

Bricmont (Jean), *Quantum sense and nonsense*. – [s. l.] : Springer International Publishing, 2017. – x, 286 p. – 1 vol. électronique. – 23,79 €. – isbn 978-3-319-65271-9.

Bricmont (Jean), *Making sense of quantum mechanics*. – [s. l.] : Springer International Publishing, 2016. – x, 331 p. – Un vol. électronique. – 41,64 €. – isbn 978-3-319-25889-8.

Quelle interprétation donner à la mécanique quantique ? À lire et entendre les vifs débats contradictoires entre les partisans des différentes écoles de pensée, chacun saisira qu'il s'agit de l'une des grandes questions demeurant encore sans réponse reconnue en physique et pour laquelle aucun consensus ne semble s'établir, malgré le centenaire des fondations quantiques. La mécanique quantique est la théorie fondamentale des constituants élémentaires de la nature, souvent présentée — de façon réductrice — comme l'ensemble des lois physiques régissant le monde microscopique. L'exposition usuelle des apports de la mécanique quantique insiste sur la rupture radicale qu'impose cette théo-

rie au regard de notre conception antérieure des lois de la nature. Le monde de la vie quotidienne et la physique pré-quantique ou tout simplement non quantique sont dans la foulée relégués à un statut aseptisé et qualifiés de « classiques ». Le contraste irréductible entre les propriétés à première vue mystérieuses conférées au monde quantique et celles familières du monde classique a mené le prix Nobel de physique Richard Feynman à proclamer que « personne ne comprend la mécanique quantique ». Il n'affirme pas de la sorte que les physiciens ne maîtrisent pas le formalisme quantique et ses règles. Au contraire, la mécanique quantique est l'une des théories physiques qui a engrangé le plus de succès, prédisant nombre d'observations avec une précision inégalée. Il ne décrit pas non plus des physiciens tâtonnant à l'aveugle au sein de la théorie. La pratique confère une intuition fidèle aux prédictions du formalisme sur les phénomènes quantiques et leurs observations. À travers cette formulation simultanément provocatrice et humble, Feynman suggère une impuissance contemporaine des physiciens à appréhender l'ontologie des phénomènes quantiques. En particulier, il se réfère au constat d'un échec supposé, celui d'expliquer par des mécanismes d'horlogerie classiques, accessibles à notre entendement, les phénomènes typiquement quantiques. Autrement dit, il affirme que, malgré l'exploitation fructueuse du formalisme quantique, la signification naturelle de la théorie quantique nous échappe encore.

Les deux ouvrages rédigés par Jean Bricmont *Making sense of quantum mechanics* et *Quantum sense and nonsense* sont étroitement liés. Ils s'attaquent résolument à l'idée qu'il serait impossible de donner un sens rationnel — pour reprendre les mots de l'auteur — à la mécanique quantique. Jean Bricmont entend lever le voile du mystère quantique pour ancrer dans la réalité une physique quantique qui lui paraît à la dérive : la pique de Feynman n'est pas une fatalité. Il pourfend également les excès d'une popularisation abusive des concepts quantiques, qui alimente des pseudosciences ou verse dans le mysticisme quantique, une situation dont il tient les physiciens pour en partie responsables.

Ces deux ouvrages aux objectifs similaires se distinguent avant tout par leur public cible et par leur approfondissement des thématiques abordées. *Making sense of quantum mechanics* s'adresse à un lectorat plus spécialisé, possédant une certaine aisance avec le formalisme mathématique de la mécanique quantique : typiquement des physiciens, des mathématiciens ou des philosophes des sciences. Notons qu'il ne vise pas spécialement les experts des fondements de la mécanique quantique ; il est approprié à un public scientifique large, notamment étudiant, s'interrogeant sur la question de l'interprétation de la mécanique quantique et s'intéressant aux débats philosophiques et historiques y

afférant. *Quantum sense and nonsense* est en revanche à destination du grand public. Ce dernier livre apparaît comme une version concise et expurgée du formalisme du premier, de surcroit adaptée pour en faciliter la compréhension. Certains passages requièrent du lecteur une familiarité avec les raisonnements scientifiques afin de suivre aisément les déductions de l'auteur. Quelques sections font appel à des notions mathématiques considérées simples (ceci est laissé au jugement de chacun), ce qui pourrait entraîner des lecteurs hors de leur zone de confort. Ces illustrations mathématiques guident l'assimilation du fonctionnement du formalisme quantique, mais ne sont pas indispensables pour en appréhender les lignes directrices.

Un aspect attrayant et ambitieux de ces livres, qui témoigne de l'érudition de l'auteur, est le regroupement en leur sein d'observations d'ordres physique, philosophique et historique. Ces thématiques se révèlent d'ailleurs dès le parcours de la table des matières, où l'on découvre des chapitres consacrés plus spécifiquement aux thématiques philosophiques ou historiques, en sus de la physique quantique proprement dite et de son interprétation. De façon très caractéristique, l'auteur exploite abondamment des citations de grands physiciens et de figures historiques de la mécanique quantique, pour illustrer ses idées et argumenter. Son travail repose d'ailleurs sur une bibliographie étoffée, reprenant plus de cinq cents références pour l'ouvrage plus spécialisé et ramenée à environ deux cents pour l'autre.

D'emblée, le ton est posé. En effet, avec un titre grand public *Quantum sense and nonsense* contrastant approche sensée de la mécanique quantique et inepties quantiques, ainsi qu'un chapitre d'ouverture de l'ouvrage spécialisé intitulé *Physicists in Wonderland*, autrement dit « les physiciens au pays des Merveilles », l'auteur ne laisse planer aucun doute sur le fond de sa pensée quant aux déclarations qu'il juge extravagantes ou insensées à propos de la mécanique quantique. Sa critique est dure, caustique, et n'épargne quasiment personne : pères fondateurs de la mécanique quantique, prix Nobel, physiciens célèbres, tout qui n'exprimerait pas une vision claire et raisonnable de la signification de la théorie quantique, de sa portée, de son interprétation. Peu importe que les physiciens semblent n'y point parvenir depuis un siècle, tant ces questions sont complexes et déroutantes lorsqu'on se fie à son intuition classique ! Et pourtant — comme on le verra — c'est bien là son message : la prééminence de phénomènes soi-disant mystérieux, les concepts et propos nébuleux, les postures considérées aberrantes ne sont pas nécessaires, car il existe une interprétation de la mécanique quantique évitant tous ces écueils, à savoir la théorie de de Broglie–Bohm. Avoir banni ces discours dès que ce fût historiquement pos-

sible aurait, au contraire, évité bien des dérives et illuminé l'enseignement de la mécanique quantique. Nul besoin d'être spécialiste pour apprécier la nature du problème considéré par l'auteur. À l'aide de nombreuses citations chocs, qui incriminent inopinément leurs auteurs (incluant nombre de physiciens respectables et respectés), Jean Bricmont introduit le profane aux problèmes conceptuels typiquement associés à la mécanique quantique. Il explique les difficultés d'interprétation qu'elle soulève, notamment dans le cadre de ce qu'on dénomme l'école de Copenhague, et souligne les révolutions paradigmatiques qui lui sont attribuées à tort ou à raison dans la littérature. Ainsi, pour reprendre quelques exemples emblématiques décriés par l'auteur, cette théorie signifierait la mort de la réalité objective ; elle indiquerait que la science étudie non la réalité, mais notre connaissance de celle-ci ; elle justifierait l'intervention de la conscience au sein des processus physiques ; elle prouverait qu'aucune conception déterministe de la physique n'est désormais envisageable. De façon synthétique, l'auteur identifie trois enjeux fondamentaux de la théorie : le rôle anthropocentrique de l'observateur, qui devient prépondérant lors d'une mesure quantique, alors qu'il est pertinemment absent du cadre de la physique classique ; la question du déterminisme à l'aune des prédictions statistiques de la théorie à l'issue de mesures ; et le problème de la localité en mécanique quantique, mise à l'épreuve par le formalisme, car il suggère la possibilité d'actions instantanées à distance, révélatrices d'une forme de non-localité.

Afin que tout un chacun puisse se forger une opinion sur les mérites de la solution prônée par Jean Bricmont, les ouvrages incluent une présentation étoffée de deux phénomènes quantiques de prime abord mystérieux : les interférences et la non-localité. L'approche ici est relativement traditionnelle afin — justement — de mettre en évidence la difficulté d'appréhender les phénomènes quantiques selon les schémas d'interprétation usuels. L'auteur précise d'emblée que la non-localité des phénomènes quantiques est cependant loin d'être généralement acceptée par les physiciens, même si de son point de vue cette conclusion est inéluctable. Notons que le choix délibéré de la non-localité comme second mystère, plutôt qu'une notion connexe non controversée telle que l'intrication, anticipe la voie suivie par l'auteur pour élucider les énigmes quantiques.

Au moyen de multiples situations simples, l'auteur expose toutes les difficultés conceptuelles à appréhender d'un point de vue ontologique les phénomènes quantiques associés aux interférences de particules, qu'il s'agisse de déterminer la trajectoire suivie par la particule ou de lui attribuer certaines propriétés intrinsèques, tel le spin. L'ouvrage grand public aborde ces ques-

tions par le biais de l'expérience des deux fentes, tandis que l'ouvrage spécialisé traite directement des mesures de spin alliées à la propagation des particules au sein d'interféromètres simples. Dans un second temps, l'auteur explique comment le formalisme de la mécanique quantique, en particulier la notion mathématique de fonction d'onde ou d'état quantique de spin, prédit les observations décrites précédemment. Le formalisme combine l'évolution temporelle linéaire, déterministe, de la fonction d'onde qu'engendre l'équation de Schrödinger, à l'évolution non linéaire, probabiliste, que provoque une mesure du système quantique par un observateur. Quand l'équation de Schrödinger régente également l'évolution de l'appareil de mesure, les superpositions quantiques se transmettent au monde macroscopique, ce que symbolise le chat de Schrödinger. A priori, ce félin à la fois mort et vivant incarne l'absurdité des prédictions quantiques prises à la lettre, puisque, en pratique, seuls s'observent des chats soit morts, soit vivants. Dès lors se pose la question de l'interprétation physique de la fonction d'onde et de la complétude de la théorie quantique : la description d'un système quantique par la fonction d'onde pourrait-elle être complétée par des informations supplémentaires, tels le caractère préexistant « vivant » ou « mort » du chat ou la position des particules ? Les prédictions probabilistes de la mécanique quantique résulteraient-elles juste de notre ignorance de ce que le jargon quantique appelle des « variables cachées », c'est-à-dire des propriétés que la fonction d'onde ne détermine pas ? L'auteur met cependant en garde le lecteur contre une interprétation naïve de la fonction d'onde en termes statistiques. En effet, des théorèmes excluent les types de variables cachées les plus intuitives, que ce soit pour expliquer les résultats probabilistes de mesures de positions et de vitesses ou de mesures de spin.

Le second mystère quantique, la non-localité, émerge via deux situations phares associées à ce débat, que les spécialistes connaissent sous le nom du paradoxe EPR et de la violation des inégalités de Bell. L'auteur soutient que la combinaison de ces deux expériences implique que le monde est non local. Il illustre le paradoxe EPR au moyen des boîtes d'Einstein : deux boîtes fermées placées à grande distance l'une de l'autre, qui contiennent une seule particule dans un état superposé tel qu'on trouve la particule avec une chance sur deux lors de l'ouverture d'une boîte. L'auteur affirme que, pour préserver la localité en physique, il faut que la particule ait été préalablement localisée dans la boîte qui la contient après ouverture, c'est-à-dire que les variables cachées sont nécessaires : l'alternative étant que l'ouverture d'une boîte « projette » instantanément à distance la particule dans l'une des boîtes, ce qui correspond à de la non-localité. Il décrit ensuite une situation anthropomorphique, le jeu de Bell, et l'expérience quantique associée, lesquelles font intervenir des observa-

tions en deux lieux éloignés, dont les résultats sont corrélés d'une manière bien plus forte que ce que permet la physique classique en supposant la localité de la nature. Les corrélations classiques obéissent au théorème de Bell, que violent les corrélations quantiques. Dans le cadre quantique, ce théorème établit l'incompatibilité de la localité et des variables cachées. Aux yeux de l'auteur, il n'y a dès lors pas d'échappatoire à la non-localité : l'expérience EPR prise isolément requiert des variables cachées pour préserver la localité, mais Bell établit que les variables cachées sont incompatibles avec la localité. Ceci mérite un commentaire puisque, de l'aveu de l'auteur lui-même, la non-localité n'est pas acceptée de manière générale par les physiciens et que l'un des ouvrages s'adresse à des non-spécialistes. Admettre la non-localité constitue une révolution conceptuelle et exige donc des preuves expérimentales indéniables pour convaincre bon nombre de physiciens. Le théorème de Bell est de bien plus grande portée que le paradoxe EPR. En effet, il se prouve indépendamment de la théorie quantique et sa violation est vérifiée par l'expérience. Il nous renseigne directement sur la nature elle-même. La partie EPR de l'argument s'inscrit, elle, au sein du formalisme quantique. À ce jour, il manque encore une preuve expérimentale de la non-localité qui découlerait d'un critère d'exclusion fermement établi, comme le fait irréfutablement le théorème d'incompatibilité de Bell. Quelle que soit l'opinion qu'on se forge au vu des indices de non-localité, le mystère reste néanmoins bien présent.

Avant de démystifier la mécanique quantique, l'auteur précise sa conception philosophique de ce que signifie faire de la science, avec, en toile de fond, les questions soulevées par la théorie quantique et son interprétation, en connexion avec les notions de déterminisme et de hasard. L'existence d'une réalité objective en dehors de la pensée revêt un caractère primordial à ses yeux. Ne plus parler du monde en soi, mais seulement de nos interactions avec celui-ci constituerait une grande défaite de la science. Ainsi, s'exprimant à propos du réalisme, de l'idéalisme et même du solipsisme, il conclut que les physiciens se doivent d'être réalistes. À la lecture des ouvrages, l'on ressent que sa conception philosophique du monde et de la science a joué un rôle prépondérant dans sa préférence d'une interprétation particulière de la mécanique quantique, la théorie de de Broglie–Bohm, car ces deux visions s'accordent en harmonie.

Dans la théorie de de Broglie–Bohm, les particules quantiques possèdent des trajectoires définies. Comment les interférences s'expliquent-elles alors pour les particules ? L'onde et la particule coexistent : la fonction d'onde, qui peut se propager selon plusieurs chemins et interférer, guide la particule le long de sa trajectoire, d'où son nom « d'onde-pilote ». La théorie est déterministe

et la notion d'observateur n'occupe plus de rôle central. Elle prédit cependant les mêmes résultats statistiques lors de mesures que la mécanique quantique usuelle, en raison d'une méconnaissance des positions initiales des particules. Le prix à payer est l'apparition inévitable de la non-localité, puisqu'il s'agit d'une théorie où les positions des particules jouent le rôle de variables cachées. Aux yeux de l'auteur, il s'agit cependant d'une qualité, puisqu'elle explicite la non-localité, qu'il considère avérée en mécanique quantique. De façon surprenante, les mesures quantiques de spin ou de vitesse ne révèlent pas des valeurs préexistantes de ces propriétés des particules. Les valeurs observées émergent d'une analyse des trajectoires, ce qui évite à la théorie le couperet des théorèmes d'exclusion des variables cachées d'interprétation statistique la plus intuitive. Étape par étape, l'auteur montre le pouvoir explicatif de la théorie de de Broglie–Bohm et sa capacité à résoudre des difficultés identifiées de la mécanique quantique usuelle. En éliminant le problème de la mesure de la mécanique quantique, la théorie permet selon l'auteur de se consacrer à l'étude du vrai mystère de la nature : la non-localité. Ce parcours est une invitation à poursuivre l'exploration de la théorie, les connaissances de l'auteur et le développement de la théorie dépassant visiblement le contenu de ces livres, qui, faut-il le préciser, ne sont pas des traités de mécanique bohmienne. Sur ce point, l'ouvrage plus technique exaucera la curiosité des esprits théoriciens, car il montre la connexion entre le formalisme et les concepts, notamment comment définir la vitesse des particules à partir de la fonction d'onde afin d'établir leurs trajectoires.

Au vu de tous les atouts conférés à la théorie de de Broglie–Bohm par ses partisans, pourquoi n'est-elle pas davantage diffusée et reconnue ?

Pour Jean Bricmont, la réponse se trouve pour beaucoup dans l'histoire de la mécanique quantique. La question de la localité en mécanique quantique était au cœur des préoccupations d'Einstein bien avant l'article EPR selon l'auteur, mais Einstein ne fut pas compris, ce qu'il illustre en revisitant le débat Einstein–Bohr sous cet angle. Il explique que les idées de de Broglie furent mal accueillies par l'école de Copenhague, ce qui amena de Broglie à abandonner sa théorie. Quant à Bohm, il ne parvint pas à imposer ses vues et fut ignoré pour ses opinions politiques dans le contexte du maccarthysme. Enfin, il accuse aussi les mauvaises interprétations du théorème de Bell, souvent réduit à une preuve de l'impossibilité des variables cachées, alors qu'il signifie seulement leur incompatibilité avec la localité.

De plus, il existe des interprétations alternatives de la théorie quantique, qui, elles aussi, ont leurs partisans convaincus. Clairement, toutes les inter-

prétations possèdent leurs problèmes techniques non résolus et, dès lors, les conceptions philosophiques de leurs défenseurs jouent un rôle dans leurs préférences. L'auteur discute une série représentative d'entre-elles et explique en quoi elles ne trouvent pas grâce à ses yeux. Sans tomber dans un relativisme aveugle, rejeter une interprétation sur base de difficultés techniques, qui pourraient se révéler temporaires, est un risque. L'auteur reconnaît d'ailleurs les difficultés que peut rencontrer la théorie de de Broglie–Bohm : par exemple, la non-localité crée une tension avec la conception einsteinienne de la théorie de la relativité. L'auteur botte cependant en touche en pointant cette tension dans la mécanique quantique usuelle. Il offre également des contre-arguments à des objections couramment portées contre la théorie de de Broglie–Bohm.

À titre personnel, je me risquerais — sachant pertinemment que l'auteur aura réponse à ces critiques — à ajouter que la non-localité explicite de la théorie reste une pierre d'achoppement, au moins tant que celle-ci ne sera pas communément admise. D'autre part, l'ontologie de l'onde-pilote ne coule pas de source, puisque cette onde ne se propage pas dans l'espace physique tridimensionnel, mais bien dans un espace de configuration mathématique abstrait. Enfin, la théorie de de Broglie–Bohm fournit une description possible des mécanismes sous-tendant la mécanique quantique, ce qui lui confère un sens la rapprochant des points de vues classiques, mais elle ne nous informe pas sur la signification naturelle de la théorie quantique. À ce jour, la mécanique quantique ne se déduit d'aucun principe fondateur identifié, qui jouerait un rôle similaire à celui de la constance de la vitesse de la lumière en relativité restreinte.

Les ouvrages scrutent aussi l'impact culturel de la mécanique quantique et ses pires excès aux yeux de l'auteur. Il s'attaque aux pseudosciences, aux mysticismes, aux invocations religieuses de la mécanique quantique, aux abus en sciences humaines, ainsi qu'aux récupérations idéologiques et politiques. Pour l'auteur, les scientifiques portent une part de responsabilité dans ces exploitations irrationnelles de la science, car ils ont permis l'émergence d'un débat sur la disparition supposée de l'objectivité ou de la réalité qu'impliquerait la mécanique quantique.

D'une manière générale, l'on peut regretter l'impression que donne l'auteur de s'être lancé dans une croisade en faveur de la théorie de de Broglie–Bohm, contre une irrationalité ambiante généralisée en physique, voire même contre des fantômes du passé. Beaucoup d'eau a, en effet, coulé sous les ponts depuis l'époque de Bohr, de l'ostracisme subi par Bohm ou de la confidentialité des travaux de Bell. Cela déforce son propre argument, car on est parfois tenté de douter de son objectivité. Il possède une vision du monde et semble

vouloir prouver que la mécanique quantique peut s'y conformer. Par moment, l'on pourrait souhaiter une approche plus neutre, où la nature nous informe de ce qu'elle est. Quoi qu'il en soit, au final, la théorie de de Broglie–Bohm résout élégamment des questions fondamentales soulevées par la mécanique quantique et, quelle que soit l'opinion qu'on se forgera sur la pertinence de cette théorie en tant qu'ontologie, elle offre une voie alternative, intéressante, d'investigation des phénomènes quantiques. Elle mérite sans conteste d'être mieux connue, même s'il faut reconnaître que dans le contexte actuel de la « seconde révolution quantique », toutes les questions liées aux fondements de la mécanique quantique, autrefois à la marge, ont désormais bien davantage de visibilité.

Ces livres sont chaudement recommandés à tout qui s'interroge sur la signification et les fondements de la mécanique quantique et n'est pas prêt à acheter un chat vivant et mort dans un sac.

Remerciements

Yves Caudano est chercheur qualifié du Fonds de la recherche scientifique F.R.S.-F.N.R.S. Ce travail a bénéficié du soutien de l'action de recherche concertée WeaM de l'Université de Namur.

Analyse critique

Le pragmatisme de Laudan entre réalisme et relativisme

Un exercice pédagogique difficile

Geoffroy De Brabanter
Université de Namur
Sciences, Philosophies et Sociétés & ESPHIN
geoffroy.debrabanter@unamur.be

Laudan (Larry), *Science et relativisme : quelques controverses clefs en philosophie des sciences* / traduction de Michel Dufour, préface de Pascal Engel. – Paris : Éditions matériologiques, 2017. – 262 p. – (Sciences & philosophie). – 1 vol. broché de 15 × 21 cm. – 19,00 €. – isbn 978-2-37361-131-1.

Voilà bientôt trente ans que Larry Laudan, fidèle représentant du pragmatisme en philosophie des sciences, publiait *Science and Relativism* (1990) afin d'offrir au lecteur un exposé original et accessible de la manière dont la philosophie contemporaine élaborait son rapport au monde et au connaissable en regard d'un spectre relativiste de plus en plus menaçant. À vrai dire, cet ouvrage n'a pas pris une ride. Il est même probablement plus actuel maintenant qu'il ne l'était en 1990. Pour preuve, le relativisme s'est aujourd'hui emparé de toute une série d'objets scientifiques et métaphysiques comme l'illustrent le regain du néocréationnisme, l'irruption du climato-scepticisme ou encore l'ère de la post-vérité. Face à cette mode dévastatrice, qui s'est cristallisée dans les *Science Wars* des années 90 avant de prendre la tournure que nous lui connaissons, Laudan propose ici un texte dialogique cherchant à démontrer les failles d'un courant de pensée dont la version la plus radicale considère que la science ne vaut pas mieux que la sorcellerie. Peu connu dans le monde francophone, le

philosophe américain ne bénéficiait jusqu'à présent que d'une seule traduction française (Laudan, 1995). La traduction de *Science and Relativism* par Michel Dufour contribue dès lors à la diffusion de l'œuvre de Laudan en francophonie et ce n'est pas un hasard si celle-ci figure au sein de la collection « Sciences & Philosophie » des Éditions Matériologiques — collection qui met à la disposition des lecteurs des recherches inédites dans les différents domaines de l'activité scientifique, de l'épistémologie et de la philosophie des sciences afin de réfléchir au dialogue fécond entre science et philosophie. Préfacé par Pascal Engel — connu pour son attitude extrêmement critique vis-à-vis de toute forme de relativisme en philosophie de la connaissance — et disposant d'un avant-propos du traducteur, ce livre, s'il a le mérite d'aborder d'une manière originale un sujet si épineux, n'est cependant pas exempt de toute critique, tant sur le fond que sur la forme. Ce sont ces critiques que nous nous proposons d'aborder dans les lignes qui suivent.

Dans un style clair et limpide, Pascal Engel ouvre le bal en nous présentant une introduction assez proche de celle que Laudan exposera une trentaine de pages plus loin. Il décrit également la structure particulière de l'ouvrage qui prend la forme d'une discussion à propos de six thèmes précis entre quatre personnages dont les noms sont transparents pour quiconque connait les grands représentants des principaux courants en philosophie des sciences : le réaliste Karl Selnam (contraction de Karl Popper, Wilfrid Sellars et Hilary Putnam), le positiviste Rudy Reichfeigl (contraction de Rudolf Carnap, Hans Reichenbach et Herbert Feigl), le relativiste Quincy Rortabender (contraction de W. V. O. Quine, Richard Rorty et Paul Feyerabend) et le pragmatiste Percy Lauwey (contraction de C. S. Peirce, John Dewey et Larry Laudan lui-même). Fidèle à l'esprit de l'auteur, le philosophe français souligne que l'un des messages centraux du livre est de montrer la nécessité de dépasser les caricatures relativistes en reprenant les problèmes de la philosophie des sciences, lieu d'innombrables discussions au sujet de la rationalité des sciences et de sa supériorité sur les autres formes de savoir. Il situe en outre le contenu de *Science et relativisme* dans l'œuvre plus générale de Laudan qui insiste sur la définition du progrès scientifique en termes de résolution de problèmes (Laudan, 1977) plutôt qu'en termes de rationalité des méthodes, ainsi que sur l'idée d'un « rationalisme normatif » selon lequel les normes émergent du progrès lui-même au lieu d'être des normes ultimes et inébranlables (Laudan, 1984). Ces considérations amènent finalement Engel à juger que le pragmatisme pensé par Laudan à l'aune de l'histoire des sciences est l'une des meilleures tentatives pour formuler une version suffisamment raisonnable du relativisme pour préserver des notions comme le vrai ou le progrès. C'est là un point de vue que nous partageons : le pragma-

tisme présenté par Laudan permet d'éviter les écueils d'un réalisme naïf selon lequel les théories scientifiques seraient vraies littéralement — ce que même un philosophe réaliste chevronné comme Pascal Engel nuance[1] — tout autant que ceux d'un relativisme outrancier selon lequel nos théories seraient ni plus ni moins que des constructions sociales. Car si le contexte où nous parlons n'est pas sans conséquences sur la manière dont nos théories et nos concepts sont façonnés, il faut cependant reconnaître qu'il existe des formes plus ou moins absurdes de relativisme — la plus absurde étant celle où ce dernier est à ce point généralisé que l'énoncé « tout est relatif » y est tenu pour vrai. Ainsi, *Science et relativisme* a le mérite de situer explicitement le pragmatisme entre ces deux positions extrêmes (pp. 250-251) :

> « Nous nous trouvons dans une situation où notre seul contact avec le monde passe par nos concepts. Nous posons comme vraies certaines croyances ou théories afin de rendre compte de ce monde perçu indirectement. Si ces croyances ou théories étaient entièrement flottantes (comme le croit [le relativiste]) et ne reflétaient rien du monde tel qu'il est, il serait inimaginable qu'elles puissent nous permettre de le manipuler aussi efficacement qu'on le fait. En ce qui me concerne, expliquer le succès de la science exige d'inclure les façons dont notre interaction avec la nature impose des contraintes fortes à nos systèmes de croyances ».

Ces dimensions éclairantes quant au positionnement du pragmatisme au sein des principaux courants de la philosophie des sciences demeurent l'atout principal de l'ouvrage. Nous ne pouvons donc que saluer les efforts de clarification conceptuelle qui ponctuent les différentes discussions et permettent de mieux cerner les thèses pragmatistes de Laudan — comme par exemple, lorsqu'à travers la voix de Percy, il précise que si certaines théories en sciences ne peuvent pas être *déduites de l'expérience*, ce n'est pas pour autant que nous sommes en droit d'affirmer qu'elles ne sont pas *empiriques* (pp. 173-174) ; ou lorsqu'il montre que la charge théorique d'une observation, la sous-détermination des théories par les résultats et le caractère holiste de la justification scientifique ne menacent pas l'hypothèse selon laquelle des règles objectives permettent, au moins dans certains cas, de choisir entre des théories rivales (p. 159 et suivantes).

1. « L'absolutisme s'impose. Il ne se formule pas nécessairement comme la thèse, souvent invoquée caricaturalement par les relativistes, selon laquelle il n'y a qu'une seule sorte de vérité, absolue, intemporelle, et nécessairement inaltérable, mais sous la forme de l'idée qu'il existe un ensemble de traits minimaux de la vérité » (p. 26).

Néanmoins, il n'est pas toujours aisé de suivre le fil des discussions entre nos quatre protagonistes et cela tient principalement à la forme que Laudan a voulu donner à son propos : le dialogue entre un réaliste, un positiviste, un relativiste et un pragmatiste en philosophie des sciences au sujet du progrès et de l'accumulation des connaissances, de la charge théorique et de la sous-détermination des théories scientifiques, du holisme épistémologique, des critères pour définir le succès d'une théorie scientifique, de l'incommensurabilité des paradigmes scientifiques, des intérêts et des déterminants sociaux de nos croyances,... qui sont autant de sujets s'entremêlant nécessairement, suscite une certaine confusion chez le lecteur malgré le souci de clarté qui anime l'auteur au point de reprendre parfois les arguments en présence avant d'en opérer le développement. Disons-le tout de suite, *Science et relativisme* ne s'adresse pas aux débutants. En effet, certaines notions développées par Laudan sont supposées connues et ne sont donc pas définies. En outre, le néophyte ne parviendra pas toujours à repérer les présuppositions de chaque intervenant lorsque ceux-ci échangent autour d'une question thématique, alors que tout l'enjeu pédagogique de l'ouvrage repose sur la présentation des thèses réalistes, positivistes, relativistes et pragmatistes en philosophie des sciences à travers la discussion informelle plutôt que l'essai philosophique classique. On peut d'ailleurs se demander dans quelle mesure la présence d'un représentant de chacun des courants évoqués est nécessaire au vu de certains échanges. Le but du livre étant de montrer en quoi certains aspects relativistes sont pertinents pour penser la démarche scientifique afin d'en proposer ensuite une analyse pragmatiste supérieure, nombre de discussions n'opposent en effet que Quincy (le relativiste) et Percy (le pragmatiste) si bien qu'il arrive que Karl (le réaliste) et Rudy (le positiviste) ne soient que des personnages secondaires dont le rôle est cantonné à la modération ou à relancer le débat sans que la question de relance ne puisse être clairement identifiée à un point de vue spécifiquement réaliste ou positiviste. En témoignent ces passages où c'est d'abord le réaliste qui reproche au relativiste d'être infaillibiliste à une époque où tout le monde est faillibiliste (p. 115) avant que le positiviste n'oppose cette même critique au relativiste (pp. 149-150). Soulignons aussi certaines digressions qui émaillent la discussion et auxquelles l'un des protagonistes fixe souvent un terme en rappelant simplement l'ordre du jour de la réunion qui confronte ces spécialistes fictifs, ou encore les nombreuses fois où le débat est court-circuité et laissé en suspens. Ce qui vise à laisser entendre que l'un des jouteurs a remporté la *disputatio* laisse parfois un goût de trop peu comme dans ce passage qui traite de la charge théorique et de la sous-détermination des théories scientifiques (p. 101) :

> « LE RELATIVISTE : Mais les conventions auraient pu être différentes — c'est ce qui en fait des conventions !
>
> LE RÉALISTE : Certainement. Mais même si on modifiait la signification du mot "mètre" de telle sorte qu'il désigne, par exemple, la longueur du bras de Guillaume le Conquérant, il serait encore vrai ou faux d'asserter de divers objets du monde qu'ils en mesurent tel ou tel multiple ou fraction.
>
> LE PRAGMATISTE : Je ne suis pas sûr que nous avancions beaucoup là-dessus.
>
> LE RELATIVISTE : Je suis tout à fait de cet avis. Si je peux me permettre, j'aimerais revenir sur quelque chose qu'à dit Karl il y a quelques instants ».

Ou un peu plus tard dans cette discussion au sujet de l'incommensurabilité des paradigmes scientifiques (pp. 216-217) :

> « LE PRAGMATISTE : Tu ne peux pas être sérieux, Quincy. Le principe que nos théories doivent résister aux tests à venir n'est pas simplement, comme tu le dis, une "règle de la méthode scientifique". C'est l'un des objectifs majeurs de toute recherche. L'abandonner reviendrait à dire qu'il est tout à fait indifférent que des théories marchent ou non ; et ce serait ne pas comprendre pourquoi on entreprend de développer des théories.
>
> LE POSITIVISTE : Cette longue digression sur la crédibilité de la théorie de la connaissance est intéressante, mais il me semble qu'elle nous a bien éloignés du thème central de cette matinée ».

Ou encore lors de ce débat à propos des intérêts et des déterminants sociaux des croyances (pp. 253-254) :

> « LE POSITIVISTE : (...) Où est la preuve que la prière nous permet d'anticiper ou manipuler des évènements naturels ?
>
> LE RELATIVISTE : Pose la question aux millions de chrétiens se sentant "sauvés" et ils te diront que la preuve est là, dans leurs vies quotidiennes...
>
> LE PRAGMATISTE : Messieurs, j'ai assez nettement l'impression que nous commençons à nous répéter. J'ai aussi un œil sur la montre car nous avons tous des avions à prendre ce soir ».

Si nous devons saluer l'effort pédagogique entrepris par l'auteur, force est de constater que la manière choisie ne porte pas toujours ses fruits, à moins d'opé-

rer une relecture du texte préalablement annoté, ce qui fait alors apparaître certains problèmes de fond. Voyons ce qu'il en est.

Vous l'aurez compris, le but de *Science et relativisme* est d'attaquer les thèses relativistes en philosophie des sciences en soulignant le manque de rigueur intellectuelle dont elles témoignent généralement. Laudan ne définit cependant nulle part ce qu'il entend par « relativisme », et ce n'est qu'au fil de la lecture que nous découvrons que ce dont il est question dans ce livre concerne en réalité le relativisme épistémique qui porte sur la justification des croyances — ce que Pascal Engel mentionne heureusement dès la préface de l'ouvrage. Remarquons avec le philosophe français que cela est probablement dû au caractère protéiforme du relativisme qui le rend difficilement cernable. Pour pallier le manque de rigueur dont font généralement preuve les individus qui se revendiquent de ce courant, Laudan propose d'ancrer les discussions sur ce thème au sein de l'histoire des sciences afin de confronter le relativisme scientifique, ainsi que les thèses réalistes et positivistes, à des cas concrets. Si les illustrations ne manquent pas — la mécanique classique et l'électrodynamique comme cas-limites respectifs de la théorie de la relativité et de la mécanique quantique (p. 56), le problème des déclarations qualitatives inhérentes à la pensée newtonienne (p. 58), l'étude des vortex dans la physique de Descartes (pp. 63-64), les considérations sur la géométrie euclidienne (pp. 130-131) et riemanienne (p. 198) ou les modifications fondamentales de Huygens et Bernoulli quant au paradigme cartésien (pp. 155-156) —, certaines déclarations manquent quant à elles cruellement d'exemples et courent dès lors le risque de se voir reléguées par le lecteur à de simples élucubrations philosophiques. C'est le cas notamment lorsque Karl (le réaliste) énonce les règles collectivement suffisantes permettant selon lui d'évaluer les théories scientifiques : exclure les théories qui ne parviennent pas à coller aux phénomènes connus, préférer les théories ayant des prédictions étonnantes confirmées, préférer celles qui expliquent de larges gammes de phénomènes et accepter la théorie qui offre la seule explication d'un phénomène particulier. Un exemple issu de l'histoire des sciences aurait été ici plus que bienvenu. C'est également le cas lorsque Quincy (le relativiste) affirme que toutes les rivales d'une théorie quelconque peuvent être aussi bien étayées par les résultats expérimentaux que la théorie en question, et par conséquent qu'il n'y aucune raison épistémique d'accepter ou de rejeter une théorie plutôt que n'importe laquelle de celles qui la contredisent (p. 110). Bien que nous soyons conscients de la volonté chère à l'auteur de discréditer les thèses relativistes, le fait de les présenter de manière si peu illustrée invite à se demander si quelqu'un a réellement pu soutenir ce genre de propos. C'est d'ailleurs une autre critique que nous pouvons faire ici à Laudan : si les thèses relativistes

peuvent être caricaturales, son assaut pragmatiste contre celles-ci l'est parfois tout autant. Ainsi, nous lisons qu'un penseur comme Imre Lakatos « glisse fréquemment dans un registre dont tout relativiste orthodoxe pourrait être fier » (p. 111) ou que Richard Rorty est un « relativiste notoire » (p. 169) alors que ce dernier invite pourtant explicitement à dépasser le relativisme — qui n'est selon lui qu'une fiction inventée par une métaphysique pensant le monde de manière dichotomique entre universalisme et relativisme — pour lui préférer un ethnocentrisme — qui nous caractérise tous, et, à partir de là, réfléchir au nom de quoi nous pourrions affirmer qu'une théorie devrait être préférée à une autre (Rorty, 1994). Enfin, le dernier chapitre qui s'intitule *Intérêts et déterminants sociaux des croyances* semble assimiler relativisme et constructivisme. Or, si les deux concepts ne sont pas étrangers, une analyse plus pointue de ces notions aurait servi l'exigence de rigueur chère à Laudan.

Malgré ces quelques critiques, il faut saluer le travail effectué par le philosophe américain qui, en deux-cents pages, réussit à passer en revue tous les grands débats qui continuent à animer la philosophie des sciences. On mettra aussi à son crédit une dénonciation particulièrement convaincante de ce manque de rigueur relativiste souvent décrié, et notamment de sa notoire auto-réfutation comme l'illustre ce court extrait (pp. 240-241) :

> « LE POSITIVISTE : Voyons si j'ai bien compris. Tu essayes maintenant de nous dire qu'une foule de recherches empiriques "soutient" la thèse que les résultats ne jouent presque aucun rôle dans la formation des croyances des scientifiques ?
>
> LE RELATIVISTE : Exactement !
>
> LE POSITIVISTE : Et tu veux nous dire qu'on devrait accepter ton hypothèse en vertu de tous ces résultats impressionnants ?
>
> LE RELATIVISTE : Tout à fait.
>
> LE POSITIVISTE : Mais, Quincy, si tu étais fidèle aux convictions que tu professes, tu devrais renoncer à toute tentative de fonder quoi que ce soit sur des résultats, puisque tu dis qu'ils n'ont rien à voir avec l'établissement des croyances ».

Ou celui dans lequel Quincy affirme que c'est la perspective relativiste qui a permis par exemple la critique féministe de la science (p. 246) :

> « LE PRAGMATISTE : (...) Si ce que dit quelqu'un ne fait que refléter sa propre perspective, si chaque point de vue en vaut un autre, alors personne ne sera jamais en mesure d'établir qu'un programme politique est préférable à un autre. Si vous, relativistes, avez raison, alors

> on est obligé de dire, par exemple, que l'hypothèse d'un biais genré de la science n'est qu'une hypothèse, ni mieux ni plus mal étayée que celle prétendant qu'il n'y a aucun biais de ce genre en science ».

Le jeu de la critique nous aura permis de souligner certains manquements inhérents à l'ouvrage de Laudan. Retenons que si une relecture attentive de *Science et relativisme* permet la mise en évidence d'éléments clefs qui pourront être exploités pédagogiquement avec des étudiants, le livre reste néanmoins peu accessible au néophyte.

Bibliographie

Laudan, L. (1977). *Progress and Its Problems : Towards a Theory of Scientific Growth*. London ; Henley : Routledge and K. Paul.

Laudan, L. (1984). *Science and Values : The Aims of Science and Their Role in Scientific Debate*. Berkeley ; Los Angeles ; London : University of California press, 1984. (Pittsburgh series in philosophy and history of science ; 11).

Laudan, L. (1987). *La dynamique de la science* (traduit de l'anglais par Ph. Miller ; préface de M. Meyer). Bruxelles : Pierre Mardaga éditeur, 1987. (Philosophie et langage).

Laudan, L. (1990). *Science and Relativism : Some Key Controversies in the Philosophy of Science*. Chicago ; London : The University of Chicago Press. (Science and its conceptual foundations).

Rorty, R. (1994). *Objectivisme, relativisme et vérité* (traduit de l'anglais par J.-P. Cometti). Paris : Presses universitaires de France. (L'interrogation philosophique).

Analyse critique

Cinquantième anniversaire des premiers pas de l'homme sur la Lune

Guy Demortier
Université de Namur
guy.demortier@unamur.be

Clervoy (Jean-François) - Lehot (Frank), *Histoire de la conquête spatiale*. – Louvain-la-Neuve : De Boeck Supérieur, 2019. – 256 p. – 1 vol. broché de 19,5 × 24 cm. – 25,00 €. – isbn 978-2-8073-2075-8.

Viglietti (Lukas), *Apollo confidentiel* / préface de Charlie Duke. – Louvain-la-Neuve : De Boeck Supérieur, 2019. – 256 p. – 1 vol. broché de 15 × 22 cm. – 19,00 €. – isbn 978-2-8073-2301-8.

1. Souvenirs de juillet 1969

Tous ceux qui ont eu la chance de vivre les exploits des Soviétiques et des Américains depuis 1957 ont certainement un souvenir précis de cette nuit du 21 juillet 1969 quand Neil Armstrong suivi de Buzz Aldrin a foulé le sol de la Lune. Les éditions De Boeck proposent deux nouveaux ouvrages pour faire le point sur le passé, le présent et le futur de la grande aventure spatiale.

À la réception simultanée de ces deux volumes, je n'ai pu m'empêcher d'ouvrir d'abord le premier cité ci-dessus : grand format, couverture idéalement illustrée et bandeau d'annonce invitant à découvrir « 50 ans après Apollo 11, on décide de reconquérir la Lune pour préparer les voyages vers Mars ». En le feuilletant, on découvre qu'il s'agit d'un album très richement illustré (sur toutes les pages impaires) avec, en vis-à-vis, un texte explicatif. Un coup

d'œil au sommaire nous informe qu'il s'agit d'un récit chronologique divisé en cinq épisodes : les pionniers du cosmos (1961-1967), l'homme s'envole vers la Lune : le programme Apollo (1967-1972), les stations orbitales et la navette spatiale (1973-1998), l'humanité prépare l'exploration future du cosmos (1998-2019), un nouveau bond de géant pour l'humanité (2020 et au-delà).

Le premier auteur Jean-François Clervoy est en première ligne pour en parler avec passion puisqu'il a volé deux fois à bord de la navette spatiale et une troisième fois à bord de Discovery pour un total de 675 heures dans l'espace. Frank Lehot, le co-auteur, est docteur en médecine, spécialiste en médecine aérospatiale. Il est aussi instructeur, médecin et membre d'une équipe de sécurité pour la société Novespace, société qui réalise des vols paraboliques reproduisant l'état d'impesanteur pour la recherche scientifique.

Le deuxième ouvrage cité est écrit par Lukas Viglietti. La quatrième page de couverture nous signale qu'il est commandant de bord long courrier, un suisse, né en 1969 (!) qui, à l'occasion de ses escales aux États-Unis, a tissé des liens étroits avec la majorité des acteurs du programme Apollo. Adolescent, il avait rencontré Jim Irwin, membre de la mission Apollo 15, une rencontre qui le motive pour les exploits des astronautes et le conduira, avec son épouse, à la création de SwissApollo en 2009. L'ouvrage est préfacé par Charlie Duke, le responsable de la communication à la NASA lors du vol d'Apollo 11 et donc du premier alunissage du 21 juillet 1969, déjà impliqué comme soutien de l'équipe d'Apollo 10, pilote du module lunaire de la mission Apollo 16 et dixième marcheur sur la Lune. Viglietti a bénéficié de la collaboration de René Cuillierier, physicien et grand vulgarisateur, pour nous offrir un reportage vivant.

Ces auteurs, en plus (ou dans le cadre) de leur passion pour l'exploration de l'espace, sont de fervents adeptes de la protection de l'environnement. Ils ont assimilé les recommandations des astronautes qui ont observé la Terre depuis leur vaisseau.

Étudiant en seconde candidature en sciences physiques lors de l'annonce du lancement du premier Spounik (4 octobre 1957), j'ai eu le plaisir de suivre les séances d'exercices de mécanique consacrés aux travaux des pionniers Constantin Tsiolkovski, Robert Goddard, Hermann Oberth, Serguei Korolev et Vernher von Braun : un choix des sujets qui permit à notre petit groupe de montrer une assiduité particulière pour ces travaux dirigés.

Jeune chargé de cours à l'Université de Namur (Facultés universitaires Notre-Dame de la Paix à l'époque), douze ans plus tard, le 21 juillet 1969, j'ai

suivi, avec un groupe d'amis (sur un petit écran de télévision bien sûr), le premier alunissage et la lente descente de Neil Armstrong sur le sol lunaire (quelques heures seulement après avoir suivi l'arrivée triomphale d'Eddy Merckx, vainqueur du tour de France et même de la dernière étape à Vincennes). Tous ceux qui ont vécu ces événements se souviennent encore aujourd'hui, avec précision, de leurs occupations ce jour-là et cette nuit-là. Faut-il dire ici que le sujet (l'alunissage bien sûr) fut largement commenté dans mon cours de mécanique de base quelques semaines après la rentrée académique de septembre ?

2. *L'histoire de la conquête spatiale* de Jean-François Clervoy et Frank Lehot

La présentation chronologique de *L'histoire de la conquête spatiale* permet d'en aborder la lecture sans ordre particulier : éventuellement en fonction de l'intérêt pour les illustrations. Toutefois, pour traiter des sujets intemporels, on peut trouver des informations sur : comment supporter les accélérations ? qu'est-ce que le mal de l'espace ? sortir dans le vide spatial, l'entraînement et l'emploi du temps des astronautes, les enjeux scientifiques des vols spatiaux, les risques et dangers, le sport, la dextérité, les menus travaux et la toilette quotidienne en apesanteur, la communication en vol avec la famille, la modification de la taille des astronautes à leur retour sur terre et leur réadaptation à la pesanteur, que faire après avoir marché sur la lune ?, pourquoi explorer l'espace ?...

Au moment de boucler l'édition de l'ouvrage (en mars 2019), 559 astronautes différents (mais les auteurs n'en citent nominativement que 105), de 37 nationalités, ont voyagé 1263 fois en orbite terrestre suite à 314 lancements habités depuis celui de Gagarine. Ils totalisent plus de 142 ans de présence dans l'espace à bord de 13 vaisseaux. Pour en terminer avec les nombres, ajoutons qu'un index signale des références à plus de 160 véhicules et modules spatiaux avec pour favoris : Apollo, Challenger, Discovery, Hubble, Mercury, Navette spatiale, Soyouz.

Les accidents spatiaux, que ce soit à l'entraînement ou lors de vols spatiaux, ont tué plus de 20 astronautes (soit environ 5 % de toutes les personnes ayant été dans l'espace), et beaucoup plus parmi les membres des équipages au sol. Vingt-deux personnes sont mortes dans un véhicule spatial : 3 sur Apollo 1 (lors d'une répétition en janvier 1967 pour un vol prévu en février 1967), 1 sur Soyouz 1 (avril 1967), 1 sur X-15 (avion-fusée américain, novembre 1967), 3 sur Soyouz 11 (1971), 7 sur Challenger (1986), et 7 sur Columbia (2003).

En 1967, se sont produits les premiers accidents en vol. Cette année est qualifiée d'année tragique par J.-Fr. Clervoy. Le suivant survint en 1971, au retour d'un équipage ramenant 3 Soviétiques de la station spatiale Saliout 1. On renforça les normes de sécurité dans de nombreux domaines. Mais, après une longue période sans accident majeur, on eut à déplorer les deux accidents les plus meurtriers. Ils se sont produits dans des circonstances très différentes.

Le 28 janvier 1986, la navette spatiale Challenger (c'est sa dixième utilisation) est détruite 73 secondes après son décollage, soit à une altitude de 14 kilomètres. L'analyse de l'accident (par une équipe d'experts comprenant notamment Neil Armstrong et Richard Feynman, physicien prix Nobel en 1965) a conclu à une défaillance d'un joint (fragilisé sans doute durant la nuit anormalement froide de la veille du départ) qui a permis aux gaz chauds venant du booster de s'échapper. Ces gaz ont ainsi attaqué la paroi du réservoir externe ainsi que la liaison entre le réservoir et le booster. La partie arrière du réservoir touché a déclenché la désintégration de Challenger, entraînant la perte des sept membres d'équipage. Les enquêteurs ont déterminé que plusieurs d'entre eux avaient survécu à la première explosion et auraient trouvé la mort lors de l'impact de l'habitacle avec la surface de l'eau. La photo de l'équipage est reproduite page 105, mais leurs noms sont difficilement déchiffrables sur leur badge : les voici Greg Jarvis, Christa McAuliffe, Ronald McNair, Ellison Onizuka, Judith Resnik, Michael J. Smith, et Dick Scobee. Il n'y eut plus de lancement de navette durant trois ans.

Le 1er février 2003, c'est la navette spatiale Columbia qui fut détruite lors de sa rentrée dans l'atmosphère, après une mission de deux semaines. Ce sont cette fois les dommages causés au système de protection thermique de la navette qui ont conduit à une défaillance structurelle sur l'aile gauche et finalement à l'explosion de la navette. Les enquêtes ont révélé que les dégâts sur l'arête de l'aile étaient dus à un bloc de mousse isolante qui s'était détaché du réservoir extérieur durant le décollage. La mission se poursuivit sans incident majeur durant 16 jours, alors même que la défaillance avait été constatée dès le départ. Le premier février le monde entier a assisté à la désintégration de la navette lors de sa rentrée dans l'atmosphère (à une altitude de 55 km). Les débris ont été retrouvés sur plus de 5 000 km^2. L'équipage disparu, que l'on voit au départ de la mission sur la photo de la page 153 était constitué de Rick D. Husband, William McCool, Michael P. Anderson, David M. Brown, Kalpana Chawla, Laurel B. Clark, et Ilan Ramon (le premier astronaute israélien).

Les aspects tragiques des missions spatiales occupent peu de places dans l'ouvrage de Clervoy.

Je ne crois pas être le seul à me souvenir avec émotion de ces catastrophes.

Le futur est également évoqué dans les 40 dernières pages : le tourisme spatial, le retour prochain vers la Lune, le voyage habité vers Mars (à partir de 2030 ?), l'exploitation des ressources extraterrestres, l'éventuel ascenseur spatial, le voyage interstellaire… dans 4 siècles ?

3. *Apollo confidentiel* de Lukas Viglietti

Dans *Apollo confidentiel,* Lucas Viglietti nous fait vivre ces années folles de 1969 à 1972 durant lesquelles douze hommes ont foulé la surface de la Lune. Il s'agit cette fois de la description de ces sept expéditions habitées vers la Lune (Apollo 11 à 17) illustrée seulement des photos des 12 marcheurs lunaires et, dans l'introduction des 10 chapitres, de quelques images en pleine page (en noir et blanc comme l'écran de télévision qui fut mon support visuel dans la nuit du 20 au 21 juillet 1969). Est-il utile de rappeler que 6 de ces 7 missions ont abouti à un débarquement sur le sol lunaire, puisque la mission Apollo 13 fut un échec technique, mais un grand succès humain, puisque l'équipage a été sauvé. À ces sept chapitres, Viglietti en a ajouté deux (en introduction) consacrés aux rêves des anciens de s'évader de la terre et aux préparatifs accélérés des missions américaines en raison de leur retard sur les Soviétiques et un dernier (5 pages) pour évoquer très succinctement l'avenir.

Le récit est remarquable, captivant. Il est le fruit d'un engagement de près de 40 ans qui débuta en 1981 lorsque l'auteur, âgé alors de 12 ans, assista, dans son village natal Tramelan (Suisse), à un exposé de Jim Irwin, un des acteurs de la mission Apollo 15. Il ne faut aucune image pour suivre les exploits de ces aventuriers. Le caractère des acteurs (ceux qui ont occupé les modules, mais aussi ceux qui sont restés au sol ou dans les laboratoires et ateliers) est décrit avec finesse. Viglietti les a personnellement rencontrés pour la très grande majorité.

Soucieux de l'exactitude des informations nécessaires à la compréhension des données scientifiques, les deux auteurs ont veillé, tout au long de l'ouvrage, au respect rigoureux des lois de la mécanique. Ils ne manquent pas de citer la bévue parue dans le *New York Times* qui, en 1920, attaqua Robert Goddard, auteur d'un ouvrage fondamental sur la propulsion des fusées en 1909, en déclarant : « Le Professeur Goddard ne connait pas la relation entre l'action et la réaction et la nécessité d'avoir quelque chose de plus consistant que le vide contre lequel s'appuyer. En réalité il semble seulement lui manquer la connais-

sance enseignée tous les jours au lycée » (p. 15). Les excuses du *New York Times* n'arrivèrent que 24 ans plus tard… le lendemain du lancement d'Apollo 11.

Les astronautes sélectionnés pour les 7 missions lunaires ont tous reçu une formation de pilote, pilote militaire de surcroît (sauf pour Harrison Schmitt), un critère majeur pour être retenu (outre celui d'être de petite taille) réside dans leur sang-froid face aux situations de péril. Avant d'être sélectionnés, tous ont frôlé la mort à plusieurs reprises : Neil Armstrong, en particulier, a effectué 78 missions de combat en Corée et fut sauvé miraculeusement à au moins 3 reprises, tant au combat que lors d'essais sur divers aéronefs. Le maintien d'une entente entre les membres de chaque équipage n'allait pas toujours de soi. Collins, le responsable de la mission et pilote du module de commande et de service d'Apollo 11 confié à Viglietti que les trois héros « n'étaient que trois aimables étrangers » (p. 90). Assurant le rôle de juge de paix dans l'équipe depuis plusieurs mois déjà, Collins dut même séparer Armstrong et Aldrin lorsqu'une soirée commune a dégénéré en une dispute violente.

À côté de l'analyse des comportements humains dans ces missions d'exception, Viglietti qui consacre le plus grand nombre de pages (40) pour décrire l'aventure d'Apollo 11, met l'accent sur les originalités scientifiques et techniques rencontrées lors de cette première marche sur un sol poussiéreux. Il commente l'équilibre des deux marcheurs lors de leur déplacement avec leur équipement dorsal, leurs sensations durant leur déplacement sur une planète ne disposant pas d'atmosphère et dont l'horizon est bien plus proche que sur Terre. Évoquant les premiers mots d'Armstrong à sa descente du module lunaire, il utilise la version « C'est un petit pas pour *un* homme, un grand pas pour l'humanité » et pas « pour *l'*homme » comme souvent proposée. Les attitudes de ces deux hommes sont décrites avec tendresse et émotion.

Armstrong était un sage, en perpétuelle introspection, très soucieux de l'écologie. À l'occasion d'une de leurs nombreuses rencontres, il confia à Viglietti : « Nous avons trouvé des gens extrêmement capables pour atteindre la Lune, nous trouverons avec certitude des gens qui résoudront nos problèmes environnementaux » (p. 89). Armstrong a pris sa retraite de la NASA en 1971, il refuse alors les offres d'entreprises qui lui proposent de devenir leur porte-parole et prend un poste de professeur au département de génie aérospatial de l'université de Cincinnati. En 1986, le président des États-Unis Ronald Reagan le nomme vice-président de la commission Rogers pour enquêter sur les causes de l'accident de la navette spatiale Challenger. Le 7 août 2012, Neil Armstrong est opéré du cœur. Il décède 3 semaines plus tard à la suite de complications cardio-vasculaires dues à cette opération. Évoquant le décès de Neil Armstrong

(il venait de fêter ses 82 ans), Viglietti écrit : « J'aime à penser que, désormais, une part de la lumière intérieure de cet homme rayonne dans le clair de Lune » (p. 89).

Buzz Aldrin, né 7 mois avant son compagnon de mission et toujours en vie aujourd'hui, est un personnage nettement plus coloré, voire excentrique. « Il a tout d'une légende du rock'n roll sur le retour, portant des vestes qui ne sont pas sans rappeler les meilleures audaces vestimentaires de Rock Stewart. Espiègle, taquin, il aime à montrer, sourire en coin, qu'il est capable de faire croire n'importe quoi à n'importe qui, n'aimant pas partager la vedette, avide de toujours attirer les feux des projecteurs » (p. 56). Aldrin quitte la NASA et l'Armée de l'Air en 1972 et entame une difficile reconversion à la vie civile marquée par l'alcoolisme et la dépression. Il publie, en collaboration, divers ouvrages centrés sur l'aventure spatiale. Il participe à plusieurs émissions télévisées et des films. Il révéla en 1989 seulement qu'ils avaient déposé sur la Lune un écusson de la mission Apollo 1 portant les noms de leurs camarades tragiquement disparus Grissom, White et Shaffee. Le 19 juillet 2019, il est reçu avec Michael Collins par Donald Trump à la Maison Blanche pour les cinquante ans de la mission lunaire (mais cette dernière information n'a pu être signalée dans le livre de Viglietti).

En complément et en phase avec la présente analyse de la mission Apollo 11, voyez également ce qu'en a dit René Dejaiffe dans un article intitulé *La signification réelle d'Apollo-11* publié en janvier 1970 dans le numéro 141 (pp. 15-31) de la *Revue des Questions Scientifiques*, en lien direct avec le message officiel laissé en juillet 1969 sur le sol lunaire : « Ici, des hommes venus de la Terre ont pris pied pour la première fois sur la Lune. Nous sommes venus en paix au nom de toute l'humanité ».

Les 6 autres missions Apollo sont narrées dans la même optique : aspects techniques ou scientifiques, alternant avec l'analyse de la personnalité des acteurs. Viglietti leur consacre un nombre de pages moins important.

Effectuée dans une ambiance morose, voire un manque total d'intérêt et de reportages médiatiques, la mission Apollo 12 fut pourtant un grand succès technique (précision dans la trajectoire et grande économie de carburant par rapport à la mission précédente) et scientifique malgré un départ effrayant : la fusée Saturne V ayant été frappée à deux reprises par un violent orage. L'alunissage fut néanmoins d'une précision parfaite et permit à Pete Conrad de se poser à 160 m de la sonde Surveyor 3 arrivée le 20 avril 1967. Cette sonde était couverte d'une fine couche de poussière (une sorte de très fin verre pilé puisque

l'absence de vent ne permet pas de lisser les grains) produite lors du présent alunissage. Contrairement à l'équipage d'Apollo 11, celui-ci était composé de trois amis sincères, drôles et farceurs ! Il s'agit de Dirck Gordon (pilote du module de commande) et d'Alan Bean. Conrad a pris sa retraite de la NASA et de la marine en 1973, a alors travaillé pour différentes firmes aéronautiques et a participé à des vols d'essai du véhicule expérimental *Delta Clipper*. Il est décédé d'un accident de moto. Alan Bean a pris sa retraite en 1981 pour se consacrer à la peinture, souhaitant après 18 ans comme astronaute, traduire ce qu'il avait eu la chance de contempler durant ses missions. Il est mort en 2018 à l'âge de 86 ans.

Apollo 13 était la troisième mission du programme spatial américain qui devait amener un troisième équipage à la surface de la Lune. Les astronautes Jim Lovell et Fred Haise devaient se poser près de la formation géologique Fra Mauro, site d'un des impacts d'astéroïde les plus importants à la surface de la Lune, tandis que Jack Swigert devait rester en orbite. Mais un accident grave, qui aurait pu être fatal pour l'équipage, se produisit durant le transit entre la Terre et la Lune et imposa l'abandon de la mission et le retour vers la Terre. L'explosion d'un réservoir d'oxygène avait mis hors d'usage le module de service Apollo qui, dans un contexte normal, devait fournir à la fois l'énergie, l'eau, l'oxygène et le système propulsif durant la majeure partie de la mission. Pour survivre, l'équipage s'est réfugié dans le module lunaire Aquarius dont il ne put utiliser que des ressources fort limitées. Le vaisseau contourne d'abord la Lune avant de revenir sur Terre. Des procédures sont mises au point par les équipes au sol pour faire fonctionner le vaisseau dans des conditions très dégradées et conserver suffisamment de consommables pour permettre la survie de l'équipage et la réalisation des manœuvres indispensables jusqu'au retour sur Terre. L'enquête menée après le dénouement heureux de la mission démontre que l'accident a été provoqué à la suite d'une erreur de manipulation et de plusieurs anomalies dans la conception et la fabrication du réservoir d'oxygène. Des mesures seront prises pour corriger celles-ci pour les missions suivantes, mais cette défaillance joua un rôle majeur dans la décision de supprimer les 3 vols prévus après Apollo 17. La menace de mort pesant sur l'équipage d'Apollo 13 réveilla la curiosité des Américains, mais cette curiosité retomba néanmoins par la suite.

Après cet échec d'Apollo 13, il fallut remettre le pied à l'étrier pour lancer Apollo 14, neuf mois plus tard. Curieusement ce fut l'équipage le moins expérimenté qui en eut la charge : Alan Shepard (né en 1923 et l'aîné des astronautes du programme Apollo) était le premier américain qui fut envoyé dans

l'espace en 1961. Il n'avait à son actif que ces 15 minutes de vol suborbital, mais était en charge d'amener le module Antares sur le sol lunaire. Ses deux compagnons, comme lui-même, n'avaient pour expériences que des situations catastrophiques dont ils étaient sortis indemnes dans leurs activités de pilote. Stuart Roosa avait la charge du module de commande et Edgar Mitchell que Shepard avait personnellement choisi « parce que », disait-il, « j'avais envie de revenir vivant » était la tête pensante. Le module fut posé à environ 30 mètres de l'endroit prévu. À l'occasion de leurs deux sorties sur le sol lunaire (pour un total de près de 9 h 30 par comparaison avec les 2 h 30 et 7 h 30 à l'occasion des missions Apollo 11 et 12), Shepard et Mitchell ont effectué la majorité des expériences prévues (voir le texte intégral, bien commenté, un régal !) même s'ils n'ont pas atteint le but de leur déplacement : le cratère Cone distant de 1600 mètres du module. Ils abandonnèrent alors qu'ils étaient près du but, épuisés par leur marche en raison d'un dénivelé de 100 mètres et du poids de leur équipement, mais trompés certainement dans leur orientation par un terrain accidenté et par une mauvaise perception de l'horizon lunaire. Lors les trois missions suivantes, les explorateurs lunaires utiliseront des rovers.

C'est avec Edgar Mitchell que Lukas Viglietti a pu entretenir les relations les plus amicales : pendant ses escales lors de vols transatlantiques, c'est chez Mitchell que Viglietti passe ses journées de repos obligatoires. Aux qualités intellectuelles que Shepard avait reconnues « pour lui confier la responsabilité de le ramener vivant », Viglietti ajoute à Mitchell celles d'un poète. Voici comment ce dernier décrit son approche de notre satellite naturel, le 3 février 1971. Installé près du hublot du vaisseau piloté par Roosa en orbite lunaire, Mitchell décrit ainsi la scène : « Soudain, de derrière l'horizon de la Lune, en un long ralenti d'une immense majesté, un joyau blanc et bleu étincelant émerge, une délicate sphère bleu clair entrelacée de veines blanches se lève graduellement comme une perle dans une épaisse mer noire de la couleur du mystère. Il faut un moment pour réaliser ce que nous voyons. La Terre, notre planète. » (p. 146).

Mitchell a démissionné de la NASA en 1972. Il a fondé ensuite un institut de recherches sur la conscience et les événements psychiques : des domaines trop négligés, selon lui, par la science officielle. Il a aussi avoué publiquement croire aux extraterrestres.

La mission Apollo 15 fut conduite par Alfred Worden, pilote du module de service et par Dave Scott et Jim Irwin qui utiliseront des véhicules pour leurs déplacements lunaires de manière à explorer des reliefs accidentés. Les séjours sur la Lune et les sorties sont allongés pour totaliser une vingtaine d'heures durant chacune des trois dernières explorations (15 à 17). Sur le trajet de re-

tour, à 317 000 km de la Terre, Worden a effectué une sortie extravéhiculaire afin de récupérer, dans le module de service, des cassettes de photos de la surface lunaire, prises automatiquement pendant trois jours, alors qu'il tournait seul autour de notre satellite. Worden quitte la NASA en 1975 pour fonder l'Astronaut Scholarship Foundation qu'il dirige jusque 2011. Scott est nommé le 18 avril 1975 directeur du Centre de recherche aéronautique de la NASA, poste qu'il occupera jusqu'au 30 octobre 1977 avant de fonder sa propre société. Irwin, connu pour ses tentatives de répandre sa foi chrétienne au regard de son expérience sur la Lune, a fondé une organisation chrétienne (High Flight) expliquant comment son séjour dans l'espace lui avait fait sentir plus vivement la présence de Dieu : « Le plus important n'est pas qu'un homme ait marché sur la lune, mais que Dieu a marché sur la terre dans le corps de Jésus-Christ » (p. 192). Il est mort en 1991 d'une crise cardiaque.

Le programme Apollo prit fin en décembre 1972 avec Apollo 17. Suite aux succès des expériences par Apollo 15, 16 et 17 et en raison de la réduction des budgets alloués à la NASA, les missions 18 à 20 devenaient moins utiles. Malgré les améliorations apportées aux problèmes rencontrés, aucune des dernières missions n'échappa à des imprévus : pannes d'oxygène et d'eau, inconfort dans les scaphandres, etc. La lecture de ces trois chapitres est aussi intéressante que celle des précédents.

Parmi les 12 astronautes qui ont foulé le sol de la Lune, seuls Aldrin, Scott, Irwin, Duke et Cernan sont toujours vivants. Hormis Shepard né en 1923, tous les autres avaient à peine la quarantaine en 1969. Viglietti a eu le privilège de les côtoyer pour recueillir leur témoignage alors qu'ils lui sont plus âgés de près de 40 ans.

Analyse critique

Federico Cesi, Galileo Galilei, et la liberté de philosopher dans les sciences naturelles

Patricia Radelet-de Grave
Université catholique de Louvain
Patricia.Radelet@uclouvain.be

Galluzzi (Paolo), *The Lynx and the Telescope : The Parallel Worlds of Federico Cesi and Galileo* / translated by Peter Mason. – Leiden ; Boston : Brill, 2017. – xiv, 521 p. – (Scientific and learned cultures and their institutions ; 21). – 1 vol. broché de 16 × 24 cm. – 139,00 €. – isbn 978-90-04-34231-6.

1. Introduction

Notons immédiatement la modification de la première partie du titre. La *Liberté de philosopher dans les sciences naturelles* de l'original italien est devenue *Le lynx et le télescope* dans la traduction anglaise. Ce dernier titre, plus percutant que le premier, met en vis-à-vis le lynx, emblème choisi par Federico Cesi (1585-1630) pour l'Académie qu'il fonde à Rome en 1603, et le télescope, caractérisant l'aspect le plus important de l'œuvre de Galilée (1564-1642) destiné à faire admettre le mouvement de la Terre et donc à faire comprendre ce que l'on appelle aujourd'hui le principe de relativité galiléen. Cette partie de son œuvre se développe d'abord durant la période où il est le plus proche de Cesi et voit ses premières difficultés avec l'Église. Un des aspects importants du livre est de montrer les efforts faits par Cesi pour empêcher Galilée de tomber dans les filets de l'Inquisition.

La deuxième partie du titre, *Les mondes parallèles de Cesi et de Galilée*, n'a pas été modifiée et constitue, à mon avis, l'idée forte et originale de ce livre. Elle

annonce la réponse à la question que se pose rapidement le lecteur : qu'est-ce qui relie ces deux hommes apparemment tellement différents ?

J'ai choisi de diviser le livre en périodes, ce qui devrait permettre au lecteur de mieux percevoir son organisation qui ne ressort pas très clairement de la table des matières.

2. La première période : le télescope (chap. 1 à 5)

Galilée est à l'avant-plan de ces chapitres qui relatent l'invention très partagée du télescope. Galluzzi y rend à Galilée ce qui lui est propre, c'est-à-dire l'amélioration importante de la portée du télescope et l'idée de le tourner vers les étoiles.

L'auteur évoque, à la fin du chapitre 3, la journée fameuse du 8 mai 1611 au cours de laquelle Galilée a présenté le *Sidereus nuncius* au Collège romain. La réunion était présidée par un jésuite belge, Odon van Maelcote, et son compatriote, Grégoire de Saint-Vincent alors élève de Clavius au Collège romain, assistait à la cérémonie. Bien plus tard, Grégoire raconte encore avec enthousiasme cette journée à Huygens 4 octobre 1659 comme nous le rappelle Galluzzi. Il avait aussi rassemblé les nouvelles observations de Galilée, peu après la cérémonie, dans une lettre à Jacques van der Straeten du 23 juillet 1611:

> « Saturne ne nous apparaît pas être sphérique, mais de figure ovale ; le diamètre principal de cette figure est parallèle à l'équinoxial. Jupiter a perpétuellement comme satellites quatre planètes qui l'accompagnent toujours et tournent continuellement autour de lui, et ont des positions respectives différentes à des heures différentes ; et pourtant ils apparaissent toujours en ligne. Jupiter lui-même est toujours parfaitement sphérique. Vénus tourne toujours autour du Soleil, de même que Mercure, et il [Galilée] en est convaincu, de manière à ce que le centre de leur mouvement soit le centre du Soleil ; et Vénus est appelée nouvelle Cynthia, car tout comme la Lune elle croît et décroît. Quant aux taches sur la lune... » (Bosmans, 1903, pp. 43-44).

Grégoire de Saint-Vincent sera immédiatement convaincu par les arguments galiléens, ce qui lui vaudra quelques difficultés au sein de son collège à Gand (Dhombres & Radelet-de Grave, 2008).

Toutes ces découvertes sont soigneusement analysées par Galluzzi qui rend compte des objections faites à chacune d'elles en général et au sein de l'Église. Il est par contre souvent difficile de le suivre pour qui n'est pas profondément

familier de cette matière, car peu de repères scientifiques actuels sont donnés. Le lecteur est souvent laissé seul face à un monceau de documents difficiles à comprendre, c'est-à-dire à reformuler dans un langage actuel et à confronter au contexte de l'époque.

3. La deuxième période : la divergence de point de vue entre Cesi et Galileo (chap. 6 à 8)

La deuxième période nous permet de découvrir la divergence de point de vue entre Cesi et Galilée vis-à-vis du rapport entre les saintes Écritures et la vision observationnelle et mathématique du système planétaire.

Rappelons que le 5 mars 1616 est publié le décret anti-copernicien qui causera ou augmentera la divergence de point de vue entre Cesi et Galilée. Galluzzi décrit très nettement cette divergence :

> « Cette lettre a renforcé la conviction de Galilée que le Prince ne le suivrait pas dans la bataille qu'il comptait mener. Cesi n'était pas disposé à engager sa personne ou son académie pour défendre la vérité du système copernicien. Il soutiendrait vigoureusement le droit de Galilée à le professer, mais à une condition précise : ne pas tenter de proclamer la supériorité des démonstrations mathématiques et des preuves fournies par les observations et les expériences par rapport aux paroles de la Sainte Écriture.
>
> La priorité de Cesi était d'interpréter l'Écriture en utilisant les instruments philologiques les plus raffinés pour montrer qu'elle était en parfait accord avec les nouveautés célestes. Galilée formulait la question de la relation entre la Nature et les Écritures de manière très différente : il n'était pas nécessaire de s'efforcer de démontrer que les Écritures étaient en parfait accord avec les vérités de la Nature ; les textes sacrés devraient simplement disparaître de l'horizon des discussions sur la philosophie naturelle. » (Galluzzi, p. 173).

Galluzzi retrace alors l'évolution des relations entre l'Académie des Lyncei et Galilée d'une part et le Collège romain et Grassi, son mathématicien, successeur de Clavius, de l'autre. Grassi qui a publié la *Balance astronomique* à laquelle Galilée opposera le *Saggiatore*.

> « Tout en reconnaissant les bonnes intentions de ses amis romains, les principes qui avaient transformé sa vie en conflit constant avec ceux qui s'opposaient à la liberté de pensée dans la philosophie natu-

> relle ne lui permettaient pas de tenir compte de leurs recommandations. » (Galluzzi, p. 284).

C'est sur « la liberté de pensée dans la philosophie naturelle » que Galluzzi veut attirer notre attention. Elle sera au centre de la dernière partie de son ouvrage[1].

4. La troisième période : le microscope (chap. 9 à 11)

Du 8 au 21 mai 1624, Galilée se trouve chez Cesi à Acquasparta et montre à ce dernier, et à quelques autres, le microscope qui doit l'impressionner, lui qui a tourné ses recherches vers la biologie. Son objectif est de donner une vision générale et corrélée de l'ensemble de la nature : animale, végétale et inerte.

À cette époque, Galilée prépare le *Dialogo* et poursuit son élaboration du principe de relativité. Pour montrer au lecteur l'expérience utilisée par Galilée dans le but d'« expliquer à Cesi et Stelluti les concepts fondamentaux de sa nouvelle science du mouvement et ses implications cosmologiques » (p. 303), Galluzzi choisi de citer une lettre de Stelluti datée du 8 janvier 1633, publiée dans les appendices à l'édition nationale en 2015 :

> « Alors que je traversais le lac de Pediluco avec Galilée dans une barque à six rames, qui avançait à une allure assez rapide. Assis d'un côté du bateau et moi de l'autre, Galilée m'a demandé si j'avais sur moi un objet lourd. J'avais la clé de ma chambre, qu'il a prise ; et pendant que le bateau voyageait rapidement, il a jeté la clé haut en l'air. Je pensais qu'elle serait perdue dans l'eau, mais bien que le bateau ait avancé de seize à vingt mètres, la clé est retombée entre lui et moi ; parce que, outre sa trajectoire ascendante, elle avait acquis, à cause du mouvement du bateau, la tendance à le suivre, ce qu'elle a fait » (Galilei, 1633/2015, pp. 230-231 ; Galluzzi, p. 303).

Cette expérience montre bien que le mouvement de montée et de redescente de la clef est le même dans le bateau immobile et dans le bateau en mouvement. Et que par conséquent, cette même expérience faite sur Terre ne permet pas de dire si cette dernière est immobile ou en mouvement. On peut s'étonner de ce choix, car dans la deuxième journée du *Dialogo* on trouve un raisonnement beaucoup plus puissant allant dans le même sens. Il s'agit d'une série d'expériences qui montrent l'invalidité de toutes celles que l'on met en avant contre le mouvement de la Terre :

1. Elle a déjà fait l'objet d'une publication : Galluzzi, 2014.

> « Enfermez-vous avec un ami dans la plus grande cabine sous le pont d'un grand navire et prenez avec vous des mouches, des papillons et d'autres petites bêtes qui volent ; munissez-vous aussi d'un grand récipient rempli d'eau avec de petits poissons ; accrochez aussi un petit seau dont l'eau coule goutte à goutte dans un autre vase à petite ouverture placé en dessous. Quand le navire est immobile, observez soigneusement comme les petites bêtes qui volent vont à la même vitesse dans toutes les directions de la cabine, on voit les poissons nager indifféremment de tous les côtés, les gouttes qui tombent entrent toutes dans le vase placé dessous ; si vous lancez quelque chose à votre ami, vous n'avez pas besoin de jeter plus fort dans une direction que dans une autre lorsque les distances sont égales ; si vous sautez à pieds joints, comme on dit, vous franchirez des espaces égaux dans toutes les directions.
>
> Quand vous aurez soigneusement observé cela, bien qu'il ne fasse aucun doute que les choses doivent se passer ainsi quand le navire est immobile, faites allez le navire à la vitesse que vous voulez pourvu que le mouvement soit uniforme, sans balancement dans un sens ou l'autre, vous ne remarquerez pas le moindre changement dans tous les effets qu'on vient d'indiquer; aucun ne vous permettra de vous rendre compte si le navire est en marche ou immobile » (Galilei, 1632/1897, pp. 212-214 ; Galilei, 1632/1992, pp. 204-205).

Ce passage est fidèlement traduit par l'expression actuelle du principe de Galilée, « les lois de la nature et donc leur expression mathématique sont invariantes sous les transformations de Galilée », c'est-à-dire celles qui font passer d'un repère au repos à un repère en mouvement rectiligne et uniforme. L'important est d'observer, dans cette rédaction de Galilée, la volonté de généraliser le principe à toutes les lois de la nature et plus seulement à la chute des corps.

Il est étonnant de constater que ni Koyré, dans ses *Études galiléennes* de 1966, ni Tonnelat, dans son *Histoire du principe de relativité* de 1971, ne mentionnent ce passage essentiel.

5. La quatrième période : un lien intellectuel profond entre Cesi et Galileo (chap. 12)

Comme Galluzzi l'a annoncé au chapitre 8, lorsque Galilée quitte Cesi et Acquasparta, ce n'est plus la défense des idées galiléennes qui soude la relation entre les deux hommes. Cesi s'est tourné vers un domaine différent de la science. C'est alors, suite au décret contre Copernic, « la liberté de pensée

dans la philosophie naturelle » qui oriente, selon Galluzzi, leurs regards dans la même direction. Galilée continue d'appliquer cette liberté dans le domaine de la compréhension du système du monde et Cesi l'applique à ce qui deviendra, avec Darwin, la théorie de l'évolution. L'œuvre de Federico Cesi dans ce domaine est pionnière, gigantesque et méconnue. Galluzzi en fait un inventaire très fouillé, mais dont les hauts faits sont difficilement compréhensibles à ceux qui ne sont pas experts de cette branche et de son histoire. Comme nous l'avons déjà souligné pour la première période avec les retombées de l'invention du télescope, la difficulté de compréhension pour le lecteur non initié est due à l'absence de références aux hauts faits avérés de cette histoire.

6. Conclusion

La plus grande richesse de ce livre est d'ordre documentaire et bibliographique. Le lecteur y trouve de très nombreuses références à une abondante littérature originale et secondaire relative à cette période et à ce sujet. Celui-ci fut souvent commenté, mais laisse toujours des questions ouvertes comme l'a montré, il y a plusieurs années, le livre de Redondi dont la thèse est également analysée par Galluzzi. La partie relative à Federico Cesi est à la fois la plus fournie et la moins connue : elle donnera certainement lieu à d'autres travaux.

Bibliographie

Bosmans, H. (1903). Documents inédits sur Grégoire de Saint-Vincent. *Annales de la Société scientifique de Bruxelles*, 27(2), 21-63.

Dhombres, J., & Radelet-de Grave, P. (2008). *Une mécanique donnée à voir : les thèses illustrées défendues à Louvain en juillet 1624 par Grégoire de Saint-Vincent s.j.* (De diversis artibus ; 82 : nouv. série ; 45). Turnhout : Brepols Publishers.

Galilei, G. (1897). *Le opere di Galileo Galilei* / direttore : A. Favaro. – Vol. 7. Firenze : Tipografia di G. Barbèra.

Galilei, G. (1992). *Dialogue sur les deux grands systèmes du monde* (traduit de l'italien par R. Fréreux, avec le concours de F. De Gandt). Paris : Éditions du Seuil.

Galilei, G. (2015). *Le opere di Galileo Galilei. Appendice*. – Vol. 2 : *Carteggio* (a cura di M. Camerota e P. Ruffo con la collaborazione di M. Bucciantini). Firenze : Giunti editore.

Galluzzi, P. (2014). *Libertà di filosofare in naturalibus : i mondi paralleli di Cesi e Galileo*. (Storia dell'Accademia dei Lincei : Studi). Accademia Nazionale dei Lincei.

Comptes rendus

Histoire des sciences

La mécanique à la lumière de son histoire : de la modernité à l'époque contemporaine. – Paris : Librairie Blanchard, 2016. – x, 211 p. – (Sciences et techniques en perspective, 2e série, vol. 18, fasc. 2). – 1 vol. broché de 16 × 24 cm. – 28,00 €. – isbn 978-2-85367-272-6.

Les articles publiés sont issus de la journée d'étude du 28 novembre 2014, tenue à l'Université de Louvain-la-Neuve et intitulée *La mécanique à la lumière de son histoire : de la modernité à l'époque contemporaine*.

On trouvera, dans ce numéro, diverses informations concernant la biographie de P. Radelet-de Grave, physicienne et historienne de la physique. Les articles de ce volume ne recouvrent pas l'ensemble des domaines auxquels elle a apporté des contributions hautement significatives et ne présentent pas non plus l'ensemble des programmes scientifiques qu'elle a mené à bien ou auxquels elle a activement participé. Aussi ne sera-t-il pas question, ici, de présenter l'œuvre de notre collègue, mais plutôt de présenter les textes que plusieurs de ses amis ont voulu concevoir et rédiger pour lui rendre hommage. C'est au fond, une reconnaissance plus grande encore, puisque c'est en songeant à ses propres travaux que les auteurs ont imaginé ces textes variés et profonds ; elle en est donc comme l'inspiratrice et il ne peut y avoir hommage plus sincère et plus appuyé que de mettre un travail original sous le parrainage d'une amie qui accepte d'y associer son nom et sa réputation.

Pour autant, les sujets abordés ont beaucoup à voir avec les travaux de P. Radelet-de Grave. Il s'agit de la mécanique, de ce qu'elle est comme domaine de la physique et de son histoire. Une première partie, constituée d'un unique article fort bienvenu, dû à Antonio Becchi, traite des rapports entre *mécanique et architecture*, un sujet lié à la culture professionnelle et aussi familiale de l'historienne célébrée.

Pour le reste, une division chronologique attendue divise les théories et activités relevant de la mécanique en deux parties, la première concerne l'âge classique et la seconde va du XIXe siècle à la période contemporaine.

Le caractère le plus marquant de cet ouvrage est, à mes yeux, le suivant : le sujet est immense, les acteurs très nombreux, les œuvres presque innombrables, les controverses, les

découvertes, les méthodes formidablement variées. Or, les auteurs ont cherché et trouvé les cœurs de cible, ils ont rendu hommage à P. Radelet-de Grave en réfléchissant avec elle et pour nous, autres lecteurs, aux zones les plus marquantes de l'histoire de la mécanique et de son épistémologie. Ainsi pour la partie « âge classique », avons-nous un premier article d'Eberhard Knobloch dans lequel Kepler est pensé comme le *brother in mind* d'Archimède (p. 21), c'est-à-dire un article qui justifie l'association de la science moderne naissante avec la rationalité grecque, notamment dans sa recherche d'une association des mécaniques et des mathématiques. Il est suivi d'un second, extrêmement original dans son classicisme : Enrico Giusti y exhibe à nouveau les *lois du choc* telles que Descartes les élabore et les expose dans les *Principia*. Il entend y découvrir une cohérence de nature mathématique et il reprend la mise en jeu des deux principes, de conservation de la quantité de mouvement et du changement minimum. Puis, sous la plume d'Antoni Malet, voici une étude newtonienne classique dans sa visée, mais originale et profonde : *Discussions of mathematical foundations, Hobbes to Newton*. L'auteur ne craint pas de voir large, lire Newton via Hobbes et Barrow, et il a raison puisqu'il en a les moyens. Il nous offre de quoi progresser dans la compréhension de cette redoutable question : en quoi et comment cette grande synthèse physique est-elle mathématique ? Cette partie se termine avec le long article de Jean Dhombres qui nous parle de *la boîte à outil graphique du physico-mathématicien*. Quelle synthèse ! Elle va de Mersenne à Fourier ! Elle se déploie à partir de *détails*, d'un *fouillis de choses*. C'est un masque derrière lequel ou grâce auquel, c'est l'ensemble de l'affaire qui est traitée : quelle est donc la nature de ces ou de cette science nouvelle ? Jusqu'où va et ira la puissance extraordinaire de la mécanique moderne et de ses modèles géométriques et analytiques ? Cet article est incontournable.

Nous entrons, p. 131, dans la troisième partie où il est question de la mécanique aux XIXe et XXe siècles. C'est P. Radelet-de Grave qui ouvre cette partie par une étude sur $\sqrt{-1}$ *comme notation de la perpendicularité vers le repère orthonormé.* Nous sommes au centre du développement de la mécanique, puisqu'elle analyse « l'idée de distinguer différents types de grandeurs physiques suivant leur comportement mathématique » (p. 155). L'auteur développe cette analyse, comme toujours, en s'appuyant sur des textes originaux, longuement cités ; c'est, derrière une sorte de modestie, la façon la plus convaincante de montrer la maîtrise historique et conceptuelle dont dispose P. Radelet-de Grave. Au cours des brèves études de Michel Willem sur *la mesure selon Borel et Lebesgue* et de Jean Mawhin sur *La forme nouvelle des équations de la mécanique d'H. Poincaré*, le fil conducteur de tout ce volume se déroule, comme on peut en juger avec la citation d'H. Lebesgue selon qui « Une mesure physique commence physiquement. Elle ne s'achève que métaphysiquement » (p. 159) et aussi avec le destin chaotique des équations d'Euler-Poincaré. Jean Bricmont nous suggère, pour terminer, une radicale inversion de perspective dans la vision que l'on a des *bons* et des *mauvais* protagonistes de la mécanique quantique. Son article *History of quantum Mechanics or a Comedy of Errors* soutient en effet qu'Einstein, Schrödinger, de Broglie n'eurent pas tort dans leur controverse avec Bohr, Heisenberg, Pauli et *al.* C'est bien un chapitre essentiel de l'histoire de la mécanique qui est ici revisité.

C'est donc grâce à P. Radelet-de Grave, grâce aux amitiés et aux débats qu'elle a générés, que nous disposons de cet excellent volume ; nous ne saurions trop l'en remercier.

VINCENT JULLIEN
Université de Nantes

FLUDD (Robert), *Œuvres complètes*. – Vol. 3 : *Histoire métaphysique, physique et technique des deux cosmos* / traduit du latin par François FABRE. – Paris : S.É.H.A. ; Milan : Archè edizioni, 2017. – 341 p. – (Textes et travaux de Chrysopœia ; 19). – 1 vol. broché de 17 × 24 cm. – 32,00 €. – isbn 978-88-7252-351-3.

GASSENDI (Pierre), *Examen de la philosophie de Robert Fludd* / texte présenté, traduit et annoté par Sylvie TAUSSIG avec le fac-similé du texte latin. – Paris : S.É.H.A. ; Milan : Archè, 2016. – 358 p. – (Textes et travaux de Chrysopœia ; 18). – 1 vol. broché de 17 × 24 cm. – 36,00 €. – isbn 978-2-9518278-7-5.

Par ce qui est sans doute une pure coïncidence éditoriale, la traduction française de l'*Utriusque cosmi* (1617) de Robert Fludd a été publiée quasi simultanément avec celle de l'*Epistolica exercitatio* (1631) que Pierre Gassendi rédigea à la demande expresse de Marin Mersenne, lequel était désireux non seulement d'être disculpé des attaques portées contre lui par le théosophe anglais, mais également de voir confirmée sa parfaite orthodoxie. Dans la mesure où le texte de Fludd n'est présenté que par une très courte introduction (5 p.), dépourvue de toutes orientations bibliographiques, et n'est accompagné que par de rares notes portant uniquement sur l'édition et la traduction du texte latin, alors que celui de Gassendi est, au contraire, flanqué d'une introduction substantielle (68 p.) et de notes fouillées (75 p.), il est permis de se demander si cette coïncidence n'est pas finalement heureuse dans la mesure où la seconde traduction mentionnée pourrait aider à la compréhension de la première. Certes, dans l'*Epistolica exercitatio*, Gassendi examine successivement (2e et 3e parties) les deux livres publiés en 1629 par Fludd à l'encontre de Mersenne, à savoir le *Sophiæ cum Moria certamen* et le *Summum Bonum*, et nullement celui qui nous occupe, en l'occurrence l'*Utriusque cosmi*. Néanmoins, étant donné que le savant français s'efforce, avant de livrer son jugement, de synthétiser, en une trentaine de pages et de façon la plus neutre possible, « quels sont les principes de la philosophie de Fludd » (1re partie), et ce en se basant notamment sur l'*Utriusque cosmi* (p. 31), la question posée nous paraît légitime. Elle l'est sans doute d'autant plus que si tout historien de la pensée scientifique a déjà rencontré, au moins une fois dans sa carrière, une image de l'*Utriusque cosmi* — elles sont bien reconnaissables et font partie intégrante de la pensée du théosophe anglais —, la lecture de cet écrit n'en est pas moins difficile pour le non spécialiste, tellement la conception du monde véhiculée, qui n'est évidemment plus la nôtre, n'est déjà plus non plus celle de la plupart des savants du XVIIe siècle. Or, il semble qu'il faille se montrer prudent : la synthèse de Gassendi, nous prévient la traductrice, ne constitue pas une bonne introduction au système fluddien, principalement en ce qu'elle se passe de ses images (pp. 18-19), à tel point qu'il est permis de s'interroger sur l'intelligibilité de sa restitution (pp. 38-39). Dont acte !

Mais au fond, quel intérêt y a-t-il à se confronter à la lecture de ces deux textes si on n'est ni un spécialiste de l'alchimie, de la kabbale, de la magie, de la chiromancie, de la musique ou de la fraternité de la Rose-Croix, ni un historien de la philosophe capable de savourer une grandiose vision du monde ? Si on n'est ni préoccupé par des problématiques théologiques — parce qu'il supprime les causes secondes pour reconnaître partout l'intervention immédiate de Dieu, Fludd est qualifié d'athée par Mersenne et, plus justement, de panthéiste par Gassendi qui lui reproche ainsi d'avoir une conception fondamentalement erronée de la divinité —, ni intéressé par des questions d'exégèse ou d'articulation des discours scientifiques et religieux — Fludd entend fonder son hexaéméron sur la philosophie « mosaïque » alors que Gassendi, dans le sillage de Galilée, rejette tout concordisme de ce type ? Si, enfin, on n'est pas davantage soucieux d'étudier les débats scientifiques — dans cette querelle, l'attitude de Gassendi, favorable à un débat critique, mais courtois et restreint aux milieux scientifiques, diverge, sans pour autant être finalement moins sévère, de celle jusque-là endossée par le Religieux Minime, à savoir celle d'une « police de la pensée » susceptible de faire appel aux autorités politiques —, mais, bel et bien, un historien de la pensée scientifique ?

La réponse n'est pas évidente. Dans l'élaboration de sa cosmogonie et, en particulier, dans sa mise en évidence de l'harmonie cosmique au moyen de son « monocorde mondain », Fludd, contrairement à Kepler, n'a que faire du monde matériel tel qu'il est étudié quantitativement par la science. Par conséquent, il ne paraît pas devoir relever de l'histoire de la pensée scientifique, même s'il saupoudre sa reconstitution intellectuelle de descriptions d'expériences et de relevés d'observations personnelles. Quant à l'*Epistolica exercitatio*, il semble que cet écrit soit, cette fois encore, guère pertinent de ce point de vue dans la mesure où il « porte essentiellement sur des questions théologiques, et non pas sur des dimensions scientifiques ou épistémologiques » (pp. 70-71). Et pourtant, en tant qu'historien de la cosmologie, il y a des choses intéressantes à glaner dans ces deux écrits. Tentons, par quelques exemples, de le prouver tout en suppléant, en cette matière, à la pauvreté ou à l'inexistence des commentaires des traducteurs.

Alors qu'il écrit une septantaine d'années après la publication du *De revolutionibus* de Copernic, Fludd reste non seulement, d'un point de vue astronomique, un géocentriste convaincu, mais également, d'un point de vue symbolique, un adepte particulièrement éloquent et représentatif de la topographie verticale traditionnellement associée à ce géocentrisme astronomique. Examinons séparément ces deux caractéristiques essentielles dès lors qu'elles ne sont pas forcément concomitantes.

D'un point de vue astronomique, Fludd réfute le système de Copernic (liv. V, chap. XV) en produisant des arguments dont certains, non conventionnels, sont dignes d'intérêt : 1°) l'ignominie de la Terre lui interdit, en tant que telle, non pas de se mouvoir, mais bien de se distinguer des autres planètes par un mouvement qui lui serait spécifique ; 2°) l'absence du bruit qui devrait nécessairement résulter d'un mouvement terrestre aussi véloce ; enfin 3°) l'argument traditionnel selon lequel il est plus aisé de mouvoir le ciel, naturellement apte au mouvement, que la Terre, naturellement lourde, mais qui — fait significatif de ce mélange fluddien de considérations éminemment abstraites et de données empiriques — reçoit ici une traduction mécanique : il est plus facile de faire tourner une

roue en exerçant une force sur sa circonférence plutôt que sur son centre. Face à cette prise de position anticopernicienne, la posture adoptée par Gassendi, alors qu'il est déjà acquis, à cette époque, au système copernicien (p. 34), est intéressante : après avoir annoncé qu'il ne s'attardera « nullement sur le fait que [Fludd] attaque Copernic et Gilbert à propos du *mouvement de la terre* », il poursuit en ne s'étonnant pas davantage que le théosophe anglais ait méprisé le commentaire copernicien relatif à la nécessité de situer l'astre du jour au centre (*De revolutionibus*, liv. I, chap. X) « dès lors qu'il parle d'une autre terre non volatile et d'un autre soleil central que ceux que nous entendons communément » (1re partie, § XVIII, p. 101). S'il est vrai que « le raisonnement est assez tortueux » (p. 221, n. 123), il est en tout cas manifeste que Gassendi refuse le débat en séparant purement et simplement, comme portant sur des objets différents, le discours fluddien et le discours scientifique. Mais faut-il comprendre, comme le laisse penser la traductrice, que c'est en raison d'une telle distinction — dont il reste à prouver qu'elle était *aussi* celle de Fludd — que le théosophe anglais a pu, « malgré sa passion pour les symboles pythagoriciens et platoniciens », rejeter l'invitation copernicienne qui lui était adressée d'adopter, pour des raisons symboliques auxquelles il aurait dû être sensible, la centration héliocentrique du Soleil ? Nous ne le pensons pas, mais pour nous justifier, il nous faut nous tourner vers la seconde caractéristique annoncée, à savoir l'adoption de la topographie verticale traditionnellement associée au géocentrisme.

D'un point de vue symbolique en effet, Fludd met en œuvre toutes les caractéristiques classiques d'une telle topographie, ce qui le conduit à dévaloriser la centralité purement géométrique de la Terre, associée au bas et donc à la bassesse, et à valoriser le Soleil situé à l'intersection de la pyramide matérielle et de la pyramide formelle, soit dans la position médiane du macrocosme. Il peut dès lors mettre en relation — selon un vieux *topos* qui, loin d'être « hérité de la littérature astrologique médiévale » (p. 222, n. 140), lui est bien antérieur[1] — l'astre du jour avec le cœur, dès lors que le microcosme, lui aussi, est pourvu d'une pyramide matérielle et d'une autre formelle qui se croisent, précisément, au niveau de cet organe. Si Fludd peut donc mépriser l'appel copernicien l'invitant à centrer le Soleil, ce n'est donc parce que l'un et l'autre parlent d'objets différents, ce n'est pas davantage parce qu'il existerait réellement une « contradiction inhérente à la doctrine fluddienne, qui est géocentrique alors même que la centralité du soleil est un de ses piliers et principes » (p. 34), mais parce qu'une telle invitation est, pour lui, sans objet dès lors que le Soleil bénéficie *déjà*, dans son géocentrisme, d'une centralité glorieuse. Mais cela, Gassendi, qui ne partage pas la même topographie que Fludd, ne peut l'admettre, comme en témoigne sa remarque. Ce qui, ici, doit être noté, c'est moins le fait que Fludd, de concert avec tous les partisans de cette topographie verticale, ait obtenu cette position médiane de l'astre solaire au prix d'une idéalisation irréfléchie, mais bien que Mersenne et Gassendi (1re partie, § XXVII, p. 110) prennent désormais conscience de cette idéalisation et l'assimilent dès lors à une erreur : ce qui était jusque-là non pas admis, mais véritablement occulté par tous les tenants de la topographie verticale est aujourd'hui dénoncé par les partisans de la nouvelle topographie héliocentrique qui, elle, positionne *vraiment* l'astre du jour au centre *spatial* du monde.

1. Cette mise en correspondance se trouve déjà chez des auteurs tels que Plutarque, Théon de Smyrne, Macrobe ou Proclus.

Même les historiens de la pensée scientifique se doivent donc de remercier nos deux traducteurs pour avoir mis à leur disposition ces textes à bien des égards étonnants !

Jean-François Stoffel
Haute école Louvain-en-Hainaut

Kepler (Johannes), *Nova stereometria doliorum vinariorum = New solid geometry of wine barrels. Accessit Stereometriæ Archimedeæ supplementum = A supplement to the Archimedean solid geometry has been added* / edited and translated, with an Introduction by Eberhard Knobloch. – Paris : Les Belles Lettres, 2018. – 350 p. – (Sciences et Savoirs - Bibliothèque de science, tradition et savoirs humanistes ; 4). – 1 vol. broché de 16 × 24 cm. – 95,00 €. – isbn 978-2-251-44832-9.

En 1615, Johannes Kepler (1571-1630) publie en latin, à Linz, un ouvrage dont le titre est *Nouvelle géométrie solide des tonneaux de vin*. D'après son biographe Max Caspar, il s'agit de l'un des chefs-d'œuvre de l'histoire des mathématiques[1]. La traduction en anglais, due à Eberhard Knobloch, est la première version complète du traité en « une langue moderne » (p. 8).

La portée du travail accompli par le *scholar* allemand est d'importance.

Dans la dédicace adressée à deux de ses protecteurs autrichiens, Kepler raconte les circonstances qui entourent la composition de son livre. Il mentionne la célébration récente de son second mariage — il était veuf et père de trois enfants — et souligne qu'à ses yeux « il était convenable au devoir de mari et de bon père de famille » de veiller au sujet de la boisson nécessaire (« *conveniens erat officio mariti, bonique patris familias, ut domui meae de necessario potu prospicerem* », pp. 54-55). Ayant donc acheté plusieurs tonneaux de vin, il vit arriver, après quelques jours, le vendeur pour fixer le prix. Il s'étonne alors de la technique du marchand qui explorait avec une même baguette de mesure tous les tonneaux, indistinctement, sans respect de la forme, sans raisonnement, sans calcul. Kepler se met en quête d'étudier les fondements géométriques de cette mesure abrégée. Afin de préparer le terrain pour aborder ces problèmes de stéréométrie, il commence par rappeler certains résultats d'Archimède à propos du cercle, du cône, de la sphère et du cylindre. Il remarque la difficulté de lire Archimède dans le texte. S'il est vrai, écrit-il dans son préambule, que le mathématicien grec a fourni dans « ses petits livres » des démonstrations parfaites, elles sont néanmoins réservées à « quelqu'un qui n'a pas de l'aversion pour leur lecture épineuse » (« *si quis à spinosa lectione eorum non abhorruerit* », p. 63).

Son interprétation des résultats contenus dans ces « libelles », portant sur la géométrie plane et solide, se basait sur des quantités indivisibles. Kepler ne pouvait certes pas savoir que son « illustre prédécesseur » avait suivi la même méthode. En effet, en 1906, Heiberg avait découvert une lettre d'Archimède à Ératosthène « remarquable par l'application ingénieuse de la mécanique à la solution des questions géométriques et par l'emploi très

1. Caspar, M. (1993). *Kepler* (translated and edited by C. D. Hellman). New York : Dover Publications. Ici, p. 233.

hardi d'une méthode comparable au calcul intégral »[1]. Lors de sa publication, la *Nouvelle géométrie solide des tonneaux de vin* fut fort critiquée, en particulier par le mathématicien écossais Alexander Anderson qui comparait les approximations de Kepler avec la rigueur d'Archimède. Avec acuité, Knobloch introduit à ce propos l'expression « *trick of history of science* » (p. 7). Il convient, peut-être, de traduire le mot « *trick* » par « ruse » pour comprendre l'idée dont il est ici question. En effet, les chantres de la rigueur ignoraient, et pour cause, la lettre à Ératosthène. Sans le savoir, tout en défendant la gloire d'Archimède, ils le critiquaient eux aussi. Par ailleurs, Kepler n'est pas dupe et il semble avoir prévu ce tohu-bohu lorsqu'il signale, à la fin de la première section du livre : « Je n'ai pas seulement terminé sa partie la plus importante de telle sorte que peu s'en faut en ce qui concerne les démonstrations pour qu'elles soient parfaites et en ce qui concerne leur usage rien n'y manque », p. 118). Il convient, à présent, de préciser que la *Nova stereometria doliorum vinariorum* comporte trois parties. Voici les thèmes principaux qui y sont traités : 1°) la géométrie solide des corps réguliers courbes avec un « supplément à Archimède » ; 2°) la géométrie solide des tonneaux autrichiens ; 3°) l'usage de la baguette du jaugeur. L'introduction de cette édition bilingue est munie d'un commentaire minutieux et critique. Un aplomb sans failles caractérise les annotations et les analyses mathématiques, au demeurant très poussées, de Knobloch. Ci et là quelques errata, inévitables comme tout auteur le sait, se glissent dans le texte (ainsi, par exemple, il faut lire : p. 60, ligne 14 : « *tying up* » ; p. 104, ligne 5 « *a cone* » ; p. 202, ligne 4 , « *from it* » ; p. 232, ligne 13, « *the following theorem* » ; p. 304, ligne 340, « *skilfully* »).

J'aimerais toutefois m'arrêter sur un passage de la traduction et pour ce faire je vais me permettre un bref détour. Dans l'écrit sur *La machine arithmétique*, Pascal dit : « pour les nouvelles inventions, il faut nécessairement que l'art soit aidé par la théorie jusqu'à ce que l'usage ait rendu les règles de la théorie si communes qu'il les ait enfin réduites en art »[2]. Cette phrase merveilleuse pointe du doigt l'hésitation dont je veux parler. Ce rapport subtil entre la théorie et l'usage se retrouve dans le savoir-faire des constructeurs de tonneaux. Les tonneliers, en effet, leur ont donné la forme qui, pour une même longueur de la ligne mesurée par les jaugeurs, leur assure la plus grande capacité possible ; aux environs du maximum, les variations sont insensibles et les petits écarts accidentels n'exercent aucune influence appréciable sur la capacité. La mesure expéditive est par suite suffisamment exacte. La pratique a donné aux artisans l'habitude de suivre une théorie dont ils ignorent les tenants et aboutissants. Ils sont donc géomètres sans le savoir. Kepler, étonné, signale « *Quis neget Naturam instinctu solo, sine etiam ratiocinatione docere Geometriam ?* ». Voici la traduction de Knobloch : « *Who can deny that geometry teaches by instinct alone without any rational reflection ?* » (pp. 230-231). Il semble, pourtant, qu'une autre « lecture » soit possible : « Qui peut nier que la Nature par instinct seul, sans nul raisonnement, puisse enseigner la Géométrie ? ». Je pense que Knobloch, latiniste chevronné, aurait pu, en une petite note, expliquer sa version.

1. On peut consulter la note de Théodore de Reinach, *Annonce de la découverte et de la publication par M. Heiberg d'un traité inédit d'Archimède conservé dans un palimpseste de Constantinople*, dans *Comptes-rendus des séances de l'Académie des Inscriptions et Belles-Lettres*, 1907, 51-56. Ici, p. 269.
2. Pascal, B. (1954). *Œuvres complètes* (édit. J. Chevalier). Paris : Gallimard. Ici, pp. 356-357.

Au début du livre, Kepler nous éclaire sur les sources de son œuvre : en un jour de fête le vin est de la partie. Et, partant, les tonneaux qui en sont remplis. Son illumination mathématique surgit en pleine vie. L'invention souffle où elle veut. Disons, plus sobrement, que souvent elle porte son choix sur une personne qui s'échine, par exemple, à déchiffrer la « *spinosa lectione* » d'Archimède. À lire Kepler, on se prend à envier — c'est une façon de parler — la désinvolture des « maîtres d'autrefois ». Il s'agit, peut-être, du signe visible de la liberté qui fait corps avec l'*Ars Inveniendi*.

Godofredo Iommi Amunátegui
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso

Dhombres (Jean) - Régnier-Roux (Daniel), *La Bibliotheca Mathematica du XVII*[e] *siècle en Europe : étude des livres de sciences mathématiques de la bibliothèque de Camille de Neufville et comparaison avec les collections de Charles-Maurice Le Tellier, Grégoire de St Vincent, Florimond de Beaune, Joachim Junge, Pierre Hérigone, Isaac Barrow, Christiaan Huygens et Galilée*. – Vol. 1 : *Analyse*. Vol. 2 : *Documents*. – Paris : Librairie Blanchard, 2017. – 304 p. + 274 p. – (Sciences et Techniques en Perspective, II[e] série, vol. 19, fasc. 1 & 2). – 2 vol. brochés de 16 x 24 cm. – 28 € + 28 €. – isbn 978-2-85367-275-7 + isbn 978-2-85367-276-4.

Les deux auteurs de ces deux volumes, Dhombres et Régnier-Roux, s'intéressent à la culture mathématique du XVII[e] siècle qui est étudiée au moyen « des livres de cette époque ou ceux, encore lus, des siècles antérieurs », ce qu'ils ont appelé la *Bibliotheca Mathematica*.

Ils ont choisi un corpus de neuf bibliothèques constituées au XVII[e] siècle et mentionnées dans le sous-titre de l'ouvrage. Leur choix est conditionné par quatre types de contraintes. La première est d'ordre géographique. On a choisi des bibliothèques de divers pays. La deuxième concerne les différents nombres de volumes des neuf collections examinées. La troisième s'appuie sur les propriétaires aux profils variés : deux archevêques, un jésuite mathématicien, un professeur de mathématiques qui n'appartient pas au monde de l'université, un juriste et amateur en sciences mathématiques, quatre savants reconnus pour leur contribution à ces sciences. Finalement, la dernière contrainte est la plus importante : les ouvrages ont été présentés selon une seule et même classification pertinente pour les neuf bibliothèques.

Les deux volumes se composent de quatre parties. La première (Dhombres) est intitulée « L'histoire des sciences mathématiques et la question d'une *Bibliotheca Mathematica* ». Elle s'occupe des questions auxquelles peut répondre l'analyse des collections de livres de mathématiques dans divers types de bibliothèques européennes, en particulier de l'essentielle question de la classification.

La deuxième partie (Régnier-Roux) décrit la bibliothèque de Camille de Neufville de Villeroy, l'archevêque de Lyon, et son environnement lyonnais, en particulier les activités de son bibliothécaire François de La Chaize. L'auteur discute la question de savoir dans quelle mesure il y avait une complémentarité des bibliothèques de l'archevêque et du collège jésuite de la Trinité et examine la *Res publica mathematica* à Lyon.

La troisième partie analyse la bibliothèque mathématique de Camille de Neufville en comparaison avec les huit autres collections européennes du XVII[e] siècle. La question de la classification joue de nouveau un rôle crucial. Les deux auteurs analysent les différentes sections de la bibliothèque mathématique, à savoir les mathématiques célestes, pures, mixtes et les cours de mathématiques. Le texte est illustré par beaucoup de figures extrêmement intéressantes.

L'épilogue explique de bon droit « qu'il n'existe pas de bibliothèques seulement mathématiques, et donc qu'il faut extraire une *Bibliotheca Mathematica* » (vol. 1, p. 280). Celle de l'archevêque de Lyon était le fait principal du jésuite François de La Chaize. Elle montre certaines qualités des bibliothèques érudites et aussi certains caractères des bibliothèques choisies. Les choix étaient guidés par l'équilibre et la diversité. Mais les deux auteurs ont pu saisir l'expression de la révolution scientifique au cœur même des bibliothèques.

La quatrième et dernière partie, ou le deuxième volume, présente « les documents de divers ordres qui ont servi de socle aux analyses et réflexions menées dans le premier volume » (2[e] vol., p. 6). Elle se compose de huit annexes, d'une courte bibliographie, d'une liste des 48 graphiques et des deux tableaux du deuxième volume, des remerciements, des crédits et d'une liste d'abréviations.

Les annexes méritent d'être expliquées un peu plus en détail. La première énumère les ouvrages des neuf bibliothèques de Camille de Neufville de Villeroy (1606-1693) (200 ouvrages), de Charles Maurice Le Tellier (1642-1710) (79 ouvrages), de Grégoire de St. Vincent (1584-1667) (297 ouvrages), de Florimond de Beaune (1601-1652) (91 ouvrages), de Joachim Junge ou Jungius (1587-1657) (298 ouvrages), de Pierre Hérigone (1580 ?-1643) (47 ouvrages), de Isaac Barrow (1630-1677) (177 ouvrages), de Christiaan Huygens (1629-1695) (226 ouvrages) et de Galilée (1564-1642) (178 ouvrages). Les livres sont groupés d'après la classification de mathématiques célestes, pures et mixtes et sont identifiés par le nom familier de l'auteur, la date de la publication et un titre abrégé. Abstraction faite de de Beaune et de Hérigone les énumérations commencent par un portrait du propriétaire.

La deuxième annexe décrit les bibliothèques mathématiques en chiffres, d'abord celle au XVII[e] siècle, ensuite les neuf bibliothèques mentionnées. Chaque fois trois graphiques ou diagrammes circulaires illustrent les trois répartitions de la bibliothèque mathématique, des ouvrages de mathématiques pures et des ouvrages de mathématiques mixtes. Les pourcentages, par exemple des cours mathématiques, des mathématiques célestes, des mathématiques mixtes et des mathématiques pures, sont toujours représentés par des secteurs circulaires.

La troisième annexe montre la répartition par ville des neuf bibliothèques mathématiques en comparaison avec le corpus total.

La quatrième annexe compare les neuf bibliothèques les unes avec les autres. À cette fin, les deux auteurs ont calculé des indices de singularité qui concernent l'originalité de la bibliothèque en question et des indices de proximité qui concernent la similarité entre deux bibliothèques du corpus.

Les 150 pages de la cinquième annexe comprennent de complètes informations bibliographiques de tous les ouvrages des neuf bibliothèques.

La sixième annexe (70 pages) présente de courtes biographies de tous les auteurs qui figurent dans les ouvrages de la bibliothèque mathématique ; la septième les professeurs de mathématiques du Collège de la Trinité à Lyon au XVIIe siècle. Par conséquent, le deuxième volume est extrêmement informatif. On ne peut pas le lire, mais l'utiliser comme un ouvrage de référence digne de confiance. Les deux auteurs montrent en fait par leurs analyses « comment l'étude de collections de livres permet de saisir les mises en place d'une culture mathématique qui n'est vraiment devenue universelle qu'au milieu du 17e siècle » (vol. 1, p. 10).

Eberhard Knobloch
Technische Universität Berlin

Bartoli (Silvana), *La felicità di una donna : Émilie du Châtelet tra Voltaire e Newton*. – Firenze : Leo S. Olschki editore, 2017. – 238 p. – (Biblioteca dell'« Archivum Romanicum ». Serie 1 : Storia, letteratura, paleografia ; 479). – 1 vol. broché de 17 × 24 cm. – 25,00 €. – isbn 978-88-222-6546-3.

Lorsqu'on écrit au sujet de l'histoire, il y a toujours des problématiques plus délicates que d'autres ou des sujets dont il est plus difficile de parler. Cela arrive pour plusieurs raisons, selon les différentes époques, mais le problème est souvent dû au fait que le travail porte sur un sujet de recherche déjà très discuté. La célèbre madame du Châtelet appartient à ce type d'enquêtes historiques où l'on risque d'être accusé de ne pouvoir rien écrire de nouveau. Mais ce danger constitue aussi une raison d'être attiré par un volume comme celui de Silvana Bartoli, car le lecteur est curieux de savoir si l'auteure a pu découvrir des documents inédits. Émilie du Chatelet est, en effet, une figure emblématique pour plusieurs branches de l'histoire. L'auteure, qui est une historienne italienne, veut parler d'Émilie comme d'une femme contemporaine, proche de nous. Tout en restant dans l'exactitude des données historiques, l'auteure a l'air de décrire un personnage actuel, avec des attitudes reconnaissables aujourd'hui, même si cette modernité reste ancrée dans les conventions du XVIIIe siècle. Ce cadre toujours en équilibre entre le livre d'histoire et la réflexion contemporaine reste, à mon avis, la valeur et le défaut de *La felicità di una donna* : *Émilie du Châtelet tra Voltaire e Newton*. Cette impression générale est sûrement le résultat du profil de Bartoli, qui est experte de l'histoire des femmes et de l'émancipation féminine au cours du temps, ainsi tous ces intérêts personnels revivent dans son regard sur la vie et les œuvres de Mme du Chatelet.

Grâce à ce regard, il nous arrive de voir « dialoguer », dans la même page, Tolstoï et de Beauvoir (p. 24). L'auteure, en fait, n'hésite pas à se déplacer dans une sorte d'atemporalité, où plusieurs héroïnes se rencontrent dans leurs comportements communs, leurs passions, leurs vies, et de ce point de vue Anna Karenina partage quelques choses avec Émilie. Cela explique bien l'idée directrice de Bartoli, à savoir que Madame du Châtelet nous parle encore : sa nature toujours en contraste entre rationalité et contrôle des passions (p. 13) est quelque chose qui nous concerne de près. Chaque épisode rapporté dans l'ouvrage est

l'occasion d'un parallèle avec des époques différentes, voire de références à des lieux très loin de ceux où a vécu du Châtelet (Bartoli mentionne par exemple l'Iraq à la p. 48). Toutes ces références ont l'avantage de donner beaucoup de stimulus à rechercher par soi-même la référence correspondante et à approfondir les noms ou les événements mentionnés.

La narration est chronologique : on part de son enfance pour suivre son éducation, maître après maître (Maupertuis, Clairaut, König, etc.). On se réjouit de sa chance d'un mariage avec un homme discret qui reconnait la supériorité d'esprit de sa femme et on se passionne dans les coulisses de sa rencontre avec Voltaire, décrit comme un investisseur habile. Tout est présenté de façon étendue, sans vides, la seule phase obscure concerne la fille Gabrielle Pauline, qu'elle marie à 16 ans avec un duc napolitain de 15 ans plus âgé. Elle mourra à 28 ans, après une dizaine de grossesses. Bartoli met l'accent sur cette fille qui, selon les témoins, avait le même talent que sa mère pour la conversation érudite, mais qui a été condamnée au plus rétrograde des destins féminins. Malgré cela, trois chapitres portent sur *comment décorer le paradis*, c'est-à-dire Cirey, la résidence d'amour et d'études d'Émilie et de Voltaire, où Bartoli laisse apparaître tous les invités illustres comme Algarotti.

Grâce à cet ouvrage, on connaît les dernières découvertes sur la production scientifique de Mme du Châtelet, par exemple beaucoup d'espace est dédié au débat sur la contribution réciproque de deux amantes aux *Institutions de physique*, mais la contribution de Mme du Châtelet à la connaissance scientifique n'est pas le centre de la narration. Dans cette sorte de communauté atemporelle de femmes rebelles, sa particularité était d'agir, de se faire connaitre par les moyens de la science, comme l'ont fait Rossella O'Hara (p. 84), Juana Inés de la Cruz, Sara Copio Sullam, Yourcenar (p. 154) par d'autres moyens.

Si on regarde la quantité de femmes auxquelles l'auteure a consacré de l'espace, on est plutôt en face d'une fresque de la condition féminine aristocratique au XVIIIe siècle, où Gabrielle Suchon devient précurseur des « célibataires par choix » des années 2000 (p. 63). Toutefois, les femmes citées étaient aussi des précurseurs dans l'incitation à dire du mal des autres afin de remplir leurs journées (p. 71), et encore une fois Émilie est exemplaire comme destinataire de l'ouvrage de Voltaire intitulé l'*Épitre sur la calomnie* (1733). À plusieurs reprises, Bartoli souligne que ne pas donner d'importance aux calomnies a été la clé du succès de nombreuses savantes et cela reste un très bon conseil aux lecteurs.

Bartoli essaie de nous offrir le portrait le plus complet possible de cette femme unique et c'est pour cela qu'aux mots d'admiration divine de Voltaire (« vaste et puissante génie, Minerve de la France », p. 80) s'accompagnent des descriptions humaines, trop humaines, comme celle de Madame du Deffand.

Bartoli nous présente Mme du Châtelet comme l'incarnation de toutes les contradictions de son temps avant d'être une scientifique. En effet, Bartoli ne voit pas du Châtelet comme une scientifique, mais nous invite à interpréter sa réussite dans le domaine comme la démonstration qu'il n'y avait aucun sens à vouloir éloigner les femmes de l'étude des sciences dures. C'est pour cela qu'elle a considéré comme nécessaire de traduire Newton.

La fin est accablante, car du Châtelet est consciente de n'avoir pas beaucoup de temps pour terminer son immortelle traduction des *Philosophiae naturalis principia mathematica* à cause de sa dangereuse grossesse tardive, dont on pourrait penser qu'elle n'était pas très

rationnelle de la part de quelqu'un qui recherchait la rationalité scientifique. Cela résume l'effort de l'auteure qui semble vouloir décrypter Émilie du Châtelet comme un mystère irrésolu et, surtout, comme une citoyenne de chaque siècle.

Corinna Guerra
Laboratoire d'excellence HASTEC (Paris)

Alembert (Jean Le Rond d'), *Mélanges de littérature, d'histoire et de philosophie* / édition critique par Martine Groult. – Paris : Classiques Garnier, 2018. – 1245 p. – (Lire le dix-huitième siècle ; 2). – 1 vol. broché de 15 × 22 cm. – 76,00 €. – isbn 978-2-406-06362-9.

Qui vraiment pourrait se plaindre de disposer d'un ensemble aussi riche de d'Alembert, quatre tomes de *Mélanges de littérature, d'histoire et de philosophie*, parus en 1759 reprenant en particulier les deux tomes parus six années plus tôt — d'Alembert avait alors 42 ans — et un cinquième paru en 1767 ? D'autant que dès le premier tome se trouve le « Discours préliminaire des éditeurs de l'Encyclopédie » (allant ici de la page 71 à la page 172), et les divers textes qui s'y rattachent, notamment la querelle avec Jean-Jacques Rousseau sur l'article « Genève ». On sait que le discours préliminaire, qui fut un temps au programme de la classe de philosophie dans les lycées français et a donc connu de nombreuses éditions critiques, reste un incontournable de tout dix-huitiémiste bon teint. De la même façon, on sera heureux de pouvoir lire en continu les réflexions sur le calcul des probabilités et l'inoculation de la petite vérole (pp. 1077-1134). Mais, cette fois, je regrette que n'y soient pas joints les textes de Daniel Bernoulli qui ont suscité les textes de d'Alembert. Si l'affaire ne se présente plus du tout scientifiquement sous le même angle, la question de la vaccination et de son refus reste un sujet actuel de société. Si, par contre, je ne suis pas de ceux qui apprécient beaucoup la reproduction des longues « remarques sur la traduction de quelques morceaux de Tacite » (pp. 495-697), latin inclus, je comprends pourtant la nécessité d'un genre, la reproduction d'un ensemble donné de textes. Mais il me semble, qu'en l'occurrence de Tacite, une version sur le Net serait bien préférable et indéniablement plus utile à consulter par les enseignants de latin, grâce à un répertoire électronique du vocabulaire, aussi bien latin que français. D'ailleurs, l'éditeur sait bien l'usage du Net, et ne manque pas de signaler des articles anciens disponibles sur Persée.fr. Mais j'insiste sur le fait que la reproduction des textes contemporains de Bernoulli sur l'inoculation est indispensable à la compréhension du débat. En tout cas comme je présente cette belle édition des Classiques Garnier dans la *Revue des questions scientifiques*, je ne peux pas me permettre de passer sous silence une véritable minoration des aspects scientifiques, même d'ailleurs sous la forme de philosophie des sciences. J'en veux pour preuve le sort ici fait à l'Éloge historique de Jean Bernoulli, qui est donné aux pages 281 à 306 du présent volume. C'est indéniablement une pièce magnifiquement écrite, dans laquelle d'Alembert explique à plusieurs reprises ses convictions sur le travail scientifique, opposant ou plutôt différenciant avec l'œuvre de nature littéraire. Ainsi quand il écrit :

> « Un bel esprit qui ne lit point, n'a pas moins à craindre de passer pour un écrivain ridicule, qu'un Géomètre qui lit trop, de n'être jamais que médiocre » (p. 290).

Martine Groult, entraînée par le ton assez désinvolte de d'Alembert qui n'en dit pas moins ce qu'il pense, ajoute quelques trop rares notes à celles de d'Alembert, qui ne suffisent pas à éclairer le lecteur. Alors que le mot « Socinien » suscite plusieurs lignes de notes, d'Euler ici nous saurons seulement qu'il « critiqua la physique de d'Alembert », et de Brook Taylor qu'il publia, en 1715, un ouvrage cité par d'Alembert. Cela ne peut que faire râler les lecteurs que les mathématiques ne repoussent pas ! On aurait bien aimé par contre que soit précisée la référence de ce qu'affirme d'Alembert comme étant dû à Galilée sur la géométrie (note 13). Au moins il y a apparemment les informations nécessaires à une telle compilation dans les affaires de philosophie ou de religion. Encore qu'aurait pu être évité le lapsus usuel sur l'Aréopage mis en Aéropage (note 28, p. 733). Mais peu importe, comme il n'importe pas plus que vienne se superposer dans les prochaines années la publication très annotée des *Mélanges* dans les *Œuvres complètes* de d'Alembert, avec le jeu des articles de l'*Encyclopédie*. Il faut prendre les choses avec plaisir comme elles paraissent, d'autant que le présent volume en 1245 pages se présente très joliment dans les classiques Garnier.

Jean Dhombres
Centre national de la recherche scientifique &
École des hautes études en sciences sociales

Verdet (Cyril), *La physique du potentiel : étude d'une lignée de Lagrange à Duhem*. – Paris : CNRS éditions, 2018. – 378 p. – 1 vol. broché de 15 × 23 cm. – 25,00 euros. – isbn 978-2-271-12264-3.

Ce livre couvre plus d'un siècle d'histoire de la physique, de la fin du XVIIIe siècle à la fin du XIXe. L'auteur analyse le développement de la physique moderne du point de vue des mathématiciens et des savants qui ont forgé le concept de *potentiel*. Le choix des titres des trois parties du livre éclaircit les trois étapes fondamentales de l'histoire de ce concept : l'étape mathématique, l'étape de la conservation de l'énergie et enfin l'étape des potentiels thermodynamiques et de la mécanique généralisée.

Dès le début, l'auteur met en communication « la physique du potentiel » avec « l'essor de la thermodynamique dans les premières décennies du siècle » et place ce rapport si étroit dans le milieu culturel qui vit l'émergence de nouvelles philosophies de la nature et le développement de la physique mathématique. Autrement dit, la systématisation de la théorie du potentiel se joignit à la systématisation de la thermodynamique dans la deuxième moitié du XIXe siècle, au moment où la physique théorique émergea en France, en Allemagne et en Grande-Bretagne. « Physique théorique » est le nom qu'on peut donner à l'alliance entre la tradition la plus spéculative de la philosophie naturelle et la physique mathématique la plus sophistiquée (pp. 9-11).

Verdet retrace la naissance du concept de potentiel dans les travaux mathématiques de Lagrange, dans le contexte d'un projet qui réduisait la mécanique à une branche de l'analyse mathématique. Pierre Simon de Laplace poursuivit la tâche de cette réduction de la physique et de l'astronomie à des systèmes d'équations différentielles (pp. 25-30). L'introduction de cette fonction ne fut pas déclenchée par la parution de quelques nouveautés

expérimentales. Elle fut une invention essentiellement mathématique ou « un artifice de calcul » comme le dit l'auteur. Toutes les forces qu'on désirait calculer étaient déduites par différentiation de la fonction potentielle.

Laplace appliqua cette fonction à des distributions continues de matière, en la définissant comme une fonction qui dépendait du corps qui était considéré comme la source de l'interaction plutôt que du couple de corps en interaction (pp. 31-39)[1]. En 1811, le potentiel fut nouvellement utilisé par Poisson dans deux mémoires sur la mathématisation de l'électrostatique de Coulomb. Onze ans plus tard, le mathématicien autodidacte anglais George Green publia un essai sur les applications de l'analyse mathématique aux théories de l'électricité et du magnétisme où les forces pouvaient être déduites mathématiquement par dérivation d'une « fonction potentielle » (pp. 48, 51-55 et 58-59).

Le deuxième chapitre du livre est consacré à une histoire de quelques aspects du concept de force de Newton à Carnot en passant pour Kant, Reech et Boscovitch : c'est un chapitre intéressant, mais qui représente un détour non nécessaire à l'analyse historique et conceptuelle de l'auteur. Globalement, le livre aborde des questions subtiles du point de vue historique et physique. Par exemple, l'auteur souligne que la fonction potentielle « est définie en tout point de l'espace » et donc qu'il « s'agit d'une influence globale » ou d'un *champ* physique, peut-être un pseudo-milieu (pp. 131-132). Mais que dire alors de Oliver Heaviside et de sa simplification mathématique des équations de Maxwell, où les champs sont les grandeurs réellement physiques et les potentiels sont des grandeurs artificielles, même fallacieuses, d'une certaine manière des vestiges du modèle de l'action à distance à l'intérieur du modèle de l'action de contact[2] ?

La solution *à la Mach* que l'auteur semble adapter à ce contexte, c'est-à-dire l'interprétation de la fonction potentielle comme étant la transformation de la cause ontologique en fonction mathématique, ne semble pas totalement convaincante. Cependant, on pourrait partager l'opinion que le potentiel représente une dissimulation des racines métaphysiques du concept de force (p. 143).

En 1834, le mathématicien irlandais William Rowan Hamilton reprit le concept de potentiel d'une façon tout à fait originale. Soit les systèmes mécaniques soit les systèmes optiques pouvaient être décrits mathématiquement par une fonction qui dépendait de la traditionnelle *force vive* et d'une « fonction de force » qui était la généralisation de la fonction Ω de Lagrange (pp. 165-167). Contrairement à Hamilton, qui voulait généraliser la portée des outils mathématiques hors des sentiers battus de la mécanique, Helmholtz se limita à une explication mécanique, en utilisant la mécanique des forces centrales attractives et répulsives (pp. 174 et 178). Hamilton aurait mérité toute l'attention accordée à Helmholtz.

1. Il s'agit ici de la distinction entre le *potentiel* et l'*énergie potentielle* qui sont considérés aujourd'hui comme deux concepts physiques distincts : l'énergie potentielle est le produit entre le potentiel généré par un des deux corps (la source de l'interaction) et la masse (ou la charge) du deuxième corps impliqué dans l'interaction.
2. O. Heaviside, *Electromagnetic Theory*, London : The Electrician Printing, 1893, p. IV.

L'auteur a justement mis en relief la voie entreprise par William Thomson avec sa distinction entre énergie statique et énergie dynamique (pp. 182-183). Thomson dépassa Helmholtz parce qu'il devait tenir compte des flux de chaleur qui représentaient un cas particulier d'énergie dynamique. Une question subtile se pose à propos de Thomson, à savoir l'opposition entre sa conception mécaniste des sciences physiques et la nécessité de tenir compte de l'irréversibilité et de la dissipation, soit des concepts qui étaient au cœur du deuxième principe de la thermodynamique. Autrement dit, le mécaniste Thomson devait associer la tradition théorique de la mécanique avec la physique mathématique extra-mécanique de Fourier.

La figure de William Macquorn Rankine est très importante pour deux motifs fondamentaux : le processus d'intégration théorique entre potentiel et énergie, et la généralisation des concepts d'énergie et de potentiel à toutes les sciences physiques et chimiques. Chez Rankine, la généralisation allait de pair avec la réunification des aspects mathématiques, physiques et philosophiques du concept de potentiel. Verdet signale « l'épaisseur ontologique » de la physique de Rankine. Sans aucun doute, il faut souligner l'engagement unificateur de Rankine : d'ailleurs sa stratégie théorique nous permet de comprendre le grand effort unificateur de Duhem (pp. 186-188).

La valeur de la troisième partie du livre réside dans l'exploration du rapport essentiel entre « la mise aux normes de la thermodynamique aux exigences de l'analyse mathématique » et la nécessité de tenir compte de l'énergie chimique. À juste titre, Verdet signale l'apport de Jules Moutier à la reconnaissance des « liens de famille » entre les phénomènes physiques et chimiques, et à la reconnaissance du rôle joué par la thermodynamique dans la découverte de ces liens (pp. 258, 261, 274 et 278).

L'auteur conduit une analyse détaillée du livre que Duhem publia en 1886, où nous trouvons les premiers pas de son projet scientifique et philosophique. Ensuite, il aborde les textes que Duhem publia en 1902, 1903 et 1911. Peut-être la documentation la plus convaincante de la démarche théorique de Duhem se trouve-t-elle dans les textes allant de la trilogie des *Commentaires aux principes de la thermodynamique* (1892-1894) à la *Théorie thermodynamique de la viscosité, du frottement et des faux équilibres chimiques* de 1896. Dans ce dernier texte, Duhem atteignit sa maturité scientifique, c'est-à-dire la formulation d'une mécanique généralisée qui embrassait la physique et la chimie. Le grand traité du 1911 n'est que l'extension et la réorganisation de l'essai de 1896.

Duhem avait un projet qui allait au-delà de la thermodynamique, qui représentait simplement la base physique d'une théorie plus générale, allant de la mécanique traditionnelle aux processus les plus explosifs de certaines réactions chimiques. Cette théorie générale reposait sur les principes de la thermodynamique du côté physique et sur une généralisation des équations de Lagrange du côté mathématique. Les équations contenaient les potentiels thermodynamiques et des termes dissipatifs, qui correspondaient à la généralisation de la viscosité et du frottement mécanique. Duhem trouva chez Rankine l'aube d'une nouvelle physique fondée sur une généralisation originale du concept de travail, où le rôle de la force et du déplacement pouvait être joué par chaque couple de grandeurs physiques appropriées : la première devait être une grandeur intensive et la deuxième une grandeur extensive.

Dans les dernières pages du livre, nous trouvons quelques considérations philosophiques et/ou métathéoriques sur la notion de « classification naturelle » et sur l'holisme de Duhem (pp. 334 et 348), sur la « similitude flagrante » entre l'idée de potentiel « telle qu'elle s'est manifestée au dix-neuvième siècle » et la physique quantique (pp. 353-355)… Les sujets sont évidemment intéressants, mais ils ne peuvent pas être développés en quelques pages.

En conclusion, je regrette un manque général de références à la littérature secondaire, surtout à la littérature en langue anglaise. Il y a donc peu de dialogue avec les autres historiens de la physique, un dialogue qui aurait pu être plus captivant et fécond.

Stefano Bordoni
Université de Bologne

Lambert (Dominique), *The atom of the universe : the life and work of Georges Lemaitre* / préface by Phillip James Edwin Peebles ; translated by Luc Ampleman ; edited by Karl Van Bibber. – 2nd edition. – Kraków : Copernicus Center Press, 2016. – 464 p. + xix p. – 1 vol. broché de 16 × 24 cm. – 44,00 €. – isbn 978-83-7886-225-3.

Nous accueillons avec grand plaisir cette traduction anglaise du magnifique livre *Un atome d'univers* publié en 2000 chez Lessius, en 2002 aux éditions conjointes Lessius et Racines, puis réédité en 2011 par Lessius. Le livre est diffusé par les Éditions du Cerf.

Nous pouvons espérer que cette traduction ait contribué à la récente modification de la dénomination de la « constante de Hubble » devenue « constante de Hubble-Lemaître ».

L'original français de ce livre ayant déjà été analysé dans cette revue par Jean-François Stoffel (vol. 171, 2000, n°3, pp. 282-283), je m'attacherai à commenter plus particulièrement la belle et nouvelle préface de Phillip James Edwin Peebles qui accompagne cette traduction. Stoffel ayant insisté sur la maestria avec laquelle l'auteur de cette biographie souligne la cohérence et la dichotomie de la pensée de Lemaître et Peebles se restreignant ouvertement à la réflexion scientifique de Lemaître sur l'évolution du cosmos, nous aurons ainsi deux regards sur ce livre.

Peebles est un astronome et cosmologue américain d'origine canadienne de renom qui a joué un rôle important dans le développement des idées de Lemaître. Il fut, entre autres, lauréat du prix Georges Lemaître en 1995 pour ses nombreuses contributions importantes à la théorie du « Big Bang » que ce dernier nommait « atome primitif ». Cette dernière expression explique le titre du livre de Dominique Lambert.

Dans son introduction, Peebles réussit un résumé, non pas du livre, car il laisse tomber l'aspect philosophique, mais bien de cette partie de l'histoire de la cosmologie à laquelle il a lui-même participé. Ce résumé à la fois succinct et complet est remarquable.

Sa préface et donc le livre s'ouvre sur ces mots : « La démonstration que notre univers physique s'est développé à partir d'un état très différent est née des progrès réalisés dans les années 1920 et 1930, qui étaient, dans une mesure frappante, l'œuvre d'une seule per-

sonne, Georges Lemaître. » Il souligne ensuite un fait avéré que la biographie de D. Lambert permet de mieux comprendre : comment sommes-nous arrivés à la compréhension actuelle de l'évolution cosmique à partir de conditions initiales de très grande densité que Lemaître appelait « atome primitif » et que Fred Hoyle a rebaptisé « Big Bang ».

Peebles part du fait que Lemaître suit une idée d'Einstein qui n'est alors qu'une hypothèse. Ce dernier estime que l'univers est le même partout à l'exception d'irrégularités à petite échelle. Partant de là, Peebles parcourt, à grands pas certes, le chemin suivi par Lemaître. D'abord via la solution mathématique des équations de la relativité générale d'Einstein pour un univers homogène non vide et en expansion correspondant à la description que nous venons de donner. Il évoque ensuite les travaux de Hermann Weyl qui connaissait le phénomène primordial du décalage vers le rouge de la lumière provenant des galaxies lointaines. Ce dernier pouvait être attribué à un mouvement d'éloignement croissant de ces galaxies. Weyl découvre à l'aide de travaux de Willem de Sitter qu'une distribution homogène de particules sans masse peut se déplacer d'une manière qui sera observée *a posteriori*. Mais l'univers de de Sitter ne contient pas de matière massive contrairement à celui d'Alexandre Friedmann que Weyl ne connaissait malheureusement pas. En 1925, Lemaître redécouvre les résultats de Weyl et, en 1927, il retrouve indépendamment la solution de Friedmann pour un univers plein en expansion. L'article qu'il publie à cette occasion porte un titre explicite : *Un univers homogène de masse constante et de rayon croissant, rendant compte de la vitesse radiale des nébuleuses extragalactiques*. Il y montre aussi que si cette solution décrit bien notre univers alors le taux de séparation des galaxies doit être proportionnel à leur séparation, comme Weyl l'avait montré dans le cas d'un univers intergalactique vide. Ces résultats sont confirmés par les nombreuses observations récentes du télescope spatial Hubble. Ce dernier doit son nom à Edwin Powell Hubble qui avait annoncé deux ans plus tard la première observation de cette relation entre vitesse de récession et éloignement.

Mais, remarque Peebles, le principal travail de Lemaître, dont le titre a été donné *supra*, sur l'expansion d'un univers contenant de la matière avait été publié dans les *Annales de la Société scientifique de Bruxelles* qui n'avait pas une large audience et Lemaître dû attendre, pour être reconnu, qu'Arthur Eddington fasse sa publicité. Cet article a connu, outre sa traduction anglaise, deux rééditions en français.

Peebles lui-même n'a lu la traduction anglaise de l'article de Lemaître que quelques années plus tard dans *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*.

C'est dans cette traduction qu'une note de bas de page a été omise, retirée par Lemaître lui-même, et qui commente la relation déjà évoquée, $v = Hr$, entre v la vitesse de récession de la galaxie et r son éloignement et où la constante de proportionnalité H est très proche de la constante que Hubble donnera deux ans plus tard.

Nous l'avons dit, Peebles occulte les problèmes philosophiques liés à la confrontation d'idées sur les débuts de l'univers vus par le cosmologue et par le religieux qu'était Lemaître. Cette confrontation donne par contre à D. Lambert la matière de, à mon avis, son plus beau chapitre : *Science et foi : la théorie des deux chemins*.

Peebles déroge pourtant à une unique occasion à sa décision de se cantonner à la physique. Il termine sa préface par une citation tirée d'un article de Lemaître intitulé *La culture catholique et les sciences positives* : « En un sens le chercheur fait abstraction de sa foi lors de ses recherches. Il fait cela non parce que sa foi pourrait le conduire à des difficultés, mais parce qu'elle n'a rien de commun avec son activité scientifique. Après tout, un Chrétien n'agit pas différemment de n'importe quel non-croyant en ce qui concerne marcher, courir ou nager. »

Patricia Radelet-de Grave
Université catholique de Louvain

Balibar (Sébastien), *Savant cherche refuge : comment les grands noms de la science ont survécu à la Seconde Guerre mondiale*. – Paris : Odile Jacob, 2019. – 252 p. – 1 vol. broché de 14,5 × 22 cm. – 23,90 €. – isbn 978-2-7381-4657-1.

L'auteur, professeur à l'École normale supérieure et membre de l'Académie des sciences (Paris), est connu internationalement dans le domaine de la physique des états condensés, spécialisé en physique des basses températures. Ceci explique, dans une large mesure, la sélection qu'il a bien dû faire parmi les centaines de scientifiques et les dizaines de savants éminents (le plus souvent d'origine juive) cherchant à fuir la montée du nazisme et de l'antisémitisme en Allemagne et ailleurs en Europe dans les années 1930-40. Malgré cette sélection, Balibar fait preuve, dans son ouvrage, d'une grande érudition sur les circonstances scientifiques, politiques et humaines de cette période tragique de l'histoire de l'Europe.

Balibar organise son récit autour de l'un d'entre ces savants, le physicien hongrois Laslo Tisza (1907-2009), physicien théoricien de la « seconde génération », celle suivant immédiatement les créateurs de la mécanique quantique de 1924 à 1928, Heisenberg, Schrödinger, Dirac et quelques autres. Il travailla avec Heisenberg à Leipzig où il rencontra plusieurs jeunes théoriciens, destinés eux aussi à s'enfuir, dont Edward Teller, Rudolf Peierls, Victor Weiskopf, Felix Bloch. Tisza a présenté sa thèse en 1930 à Budapest sur la symétrie en physique et chimie quantiques, un sujet cher à son compatriote Eugène Wigner, plus tard lui aussi réfugié en Amérique. Mais quelques années après cette thèse, il s'est intéressé aux manifestations macroscopiques de la mécanique quantique, particulièrement à l'explication de la superfluidité de l'hélium à basses températures découverte par Piotr Kapitza et d'autres en 1938. C'est lui qui, en premier, conçut le modèle des deux fluides interpénétrés, l'un normal et l'autre superfluide, condensés dans un état du type prédit par Bose-Einstein (1924-25). D'où la filiation scientifique avec Balibar qui eut encore le privilège de rencontrer Tisza personnellement en 2007 et de l'interviewer à l'occasion d'une conférence pour célébrer le centième anniversaire du savant au Massachusetts Institute of Technology où Tisza trouva son refuge définitif et poursuivit sa longue carrière.

Dans ses études et dans sa fuite, Tisza a côtoyé bon nombre de grands physiciens et chimistes occupés à appliquer la théorie quantique à partir des années 1930. Il fut collègue d'Edward Teller, déjà mentionné, chez Heisenberg à Leipzig, puis de nombreux autres théoriciens chez Lev Landau à Kharkov, le grand physicien soviétique connu surtout pour ses théories sur les transitions de phase, celle de l'hélium superfluide en particulier. Balibar

raconte les pérégrinations de Tisza de ville en ville, et finalement à Paris où il rencontra le théoricien Fritz London lui aussi réfugié du nazisme et auteur d'une thèse à Paris sur la supraconductivité et la superfluidité. Dans ses quelques premiers chapitres, grâce à des vignettes plus ou moins développées, le livre de Balibar est fort instructif pour le lecteur qui veut se remémorer ou prendre connaissance rapidement du profil et des contributions scientifiques de tous ces grands noms de la science avant et au début de la guerre, ainsi que des circonstances de leurs fuites et de leurs accueils en France, en Angleterre ou en Amérique.

Deux remarques mineures. Au chapitre 5 consacré à une brève histoire de la science et des techniques des basses températures, Balibar attribue la découverte de l'élément hélium dans la couronne solaire au seul astronome français Jules Janssen. Les anglo-saxons, eux, l'attribuent plutôt à l'astronome britannique Norman Lockyer. C'est une tendance assez répandue que plusieurs des grandes découvertes plus ou moins simultanées en science sont ainsi attribuées à deux auteurs au moins, selon leurs nationalités (comme Coulomb et Cavendish). Lockyer est celui qui, en plus de donner son nom à l'hélium, créa le journal *Nature* en 1869 dans lequel allaient être publiées d'innombrables découvertes comme celles dont Balibar parle dans son récit et qui restera, pendant 150 ans, le journal de très haut prestige que nous connaissons aujourd'hui.

Une autre petite remarque, qui pourrait être amusante si elle n'était pas sinistre, à propos de Teller. Balibar le présente, suivant en cela une tradition malencontreusement bien implantée, comme « le père de la bombe-H ». Pour la vérité historique sur cette invention, il est important d'adopter l'avis autoritaire de Hans Bethe, théoricien allemand, réfugié à Cornel en Amérique, qui élucida les mécanismes des réactions thermonucléaires dans les étoiles (1935-1938). Bethe qualifie Teller non pas de père, mais de « mère de la bombe-H qui porta l'enfant pendant 9 mois à Los Alamos ». Le père fut en réalité Stanislav Ulam, mathématicien polonais réfugié à Harvard après l'invasion de la Pologne en 1939, inventeur de la méthode de Monte Carlo. En 1951 à Los Alamos, Ulam conçut la géométrie cylindrique pour la compression du mélange deutérium-tritium par l'onde de choc thermomécanique de la bombe-A primaire. Cette idée essentielle de la bombe-H étagée fut aussitôt récupérée par Teller et convertie en implosion radiative cent fois plus rapide et plus efficace que la compression hydrodynamique. Le processus est aujourd'hui connu sous le nom de configuration Ulam-Teller, dans cet ordre. Par la suite, Teller n'eut de cesse de réclamer pour lui seul la « paternité » de l'idée. Rendons à César…

Le chapitre 10 concerne la bombe-A américaine et la contribution des savants réfugiés à sa construction tandis que le chapitre 11 porte sur le programme avorté de bombe nazie. Il faut admirer l'auteur pour avoir réussi à synthétiser toute cette histoire en une quarantaine de pages. Ici, forcément, son livre comporte quelques omissions et l'une ou l'autre imprécision qui me paraissent intéressantes à signaler.

En p. 159, Balibar fait état des efforts de Frédéric Joliot pour se procurer le minerai d'uranium du Katanga nécessaire pour ses recherches avec ses collaborateurs Hans Von Halban et Lew Kowarski qui allaient bientôt devoir quitter Paris pour se réfugier en Angleterre. L'omission ici est le rôle absolument crucial d'Edgar Sengier, Directeur de la firme belge Union minière du Haut Katanga, pour assurer la livraison du minerai non seulement

à la France, mais surtout aux États-Unis pour les bombes lancées 5 ans plus tard sur le Japon. Joliot avait rencontré secrètement Sengier le 8 mai 1939 à Bruxelles et avait obtenu de l'industriel la promesse de quelques centaines de tonnes de pechblende qui furent partiellement livrées avant l'occupation allemande en mai-juin 1940. L'autre omission est celle de la rencontre tout aussi secrète de Sengier, le 10 mai 1939 à Londres, avec Henry Tizard, recteur de l'Imperial College, conseiller du gouvernement britannique. Tizard acheva d'instruire Sengier sur la fission de l'uranium récemment découverte et de convaincre l'homme d'affaires de l'immense intérêt stratégique de la pechblende congolaise, mais il ne réussit pas à s'assurer le monopole qu'il réclamait des livraisons du minerai à la seule Angleterre.

Quant au chap. 11 et la bombe nazie (p. 178), il est fait état du fait que D_2O ralentit les neutrons moins bien que H20, ce qui est correct, mais permettrait « d'optimiser » la fission. Le fait essentiel est que l'eau lourde n'absorbe pas ces neutrons et permet ainsi une réaction en chaîne dans l'uranium naturel ce qui est impossible avec de l'eau légère comme ralentisseur en raison de l'absorption des neutrons. En p. 182, Balibar rapporte qu'un physicien nucléaire allemand, Manfred Pop, affirme que les Allemands ne connaissaient pas la différence entre fission par neutrons lents (le réacteur) et fission par neutrons rapides (la bombe). Ceci est incorrect, car c'est précisément ce que Heisenberg en personne s'efforça d'expliquer, avec diagramme à l'appui, à ses autorités politiques et militaires lors d'une réunion en juin 1942 à Berlin. En p. 184, le même M. Pop prétend que les savants allemands ignoraient l'existence d'une « route ouverte vers la bombe », via la synthèse des éléments transuraniens neptunium et plutonium, par absorption de neutrons par l'uranium 238 dans un réacteur. Ceci est incorrect également, car la conception de cette voie « facile vers la bombe » est attribuée à Carl Friedrich von Weizsäcker et Fritz Houtermans tous deux membres actifs de l'Uranverein, la société allemande pour l'exploitation civile et militaire de la fission de l'uranium pendant la guerre.

Dans les quatre derniers chapitres, l'auteur décrit le destin de Tisza et d'autres réfugiés dans leurs pays d'accueil après la Seconde guerre mondiale. Au chap. 16 qui clôt le livre, il fait état des efforts admirables menés en France pour accueillir des scientifiques étrangers issus de l'immigration grâce à la création du mouvement PAUSE (Programme d'Accueil Urgent des Scientifiques Étrangers) auquel Balibar prend prit une part active.

L'excellent ouvrage de Balibar, écrit de manière claire et dans un style fort plaisant, est le bienvenu car, à ma connaissance, il est un des rares comptes rendus détaillé en français de l'exil des savants européens fuyant le nazisme. Ceci contraste avec l'abondance de récits en anglais sur ce thème, comme par exemple le livre de Jean Medawar et David Pyke, *Hitler's Gift, Scientists who Fled Nazi Germany* (Richard Cohen Group, London, 2000) ou bien les livres de Laura Fermi (l'épouse d'Enrico) dont *Illustrous Immigrants* (University of Chicago Press, 1968) ou encore les nombreux récits autobiographiques ou des biographes des fugitifs eux-mêmes.

Amand Lucas
Université de Namur &
Académie royale de Belgique

Ginoux (Jean-Marc), *Les grandes découvertes de l'histoire de la physique et leurs démonstrations en 128 exercices*. – Paris : Éditions Ellipses, 2018. – 572 p. – 1 vol. broché de 16,5 × 24 cm. – 29,00 €. – isbn 978-2340023437.

Alors que les nouveaux programmes scolaires français introduisent, à partir de la rentrée de 2019 et dès la classe de première, un enseignement scientifique prenant en compte des considérations historiques, le livre de Jean-Marc Ginoux tombe à point nommé. Cet ouvrage volumineux recense de manière très renseignée un grand nombre d'exercices de physique, mais aussi de mathématique au gré d'une présentation chronologique.

À travers quatre périodes que sont l'Antiquité, le moyen âge et la Renaissance, l'époque moderne et l'époque contemporaine, brièvement présentées en début de chaque partie, l'auteur décline les noms importants associés à chacune d'elles. Avant chaque série d'exercices, la présentation du savant ou du scientifique concerné vient compléter la mise en perspective historique.

L'ensemble constitue donc un travail de longue haleine et forcément très méticuleux. Tout enseignant en sciences physiques sait combien il est extrêmement délicat de décliner un problème selon une suite de questions ordonnées permettant de faire émerger un raisonnement chez l'élève. Tout l'enjeu de la rédaction réside dans une énonciation suffisamment détaillée pour accompagner la réflexion et suffisamment large pour permettre à l'élève de prendre une part active au raisonnement. De ce point de vue, l'ouvrage de Jean-Marc Ginoux présente de manière alternée des énoncés très ouverts, comme « Quel est le secret d'un tel empilement ? » (*La clé de voûte et le secret des cathédrales*, p. 29), et d'autres bien plus détaillés permettant à celui qui tente de résoudre l'exercice de ne pas se perdre dans des considérations trop éloignées de ce qui est attendu. En d'autres termes, certains énoncés s'apparentent davantage à des énigmes qu'à des exercices scolaires, et ce point précis participe à faire de cet ouvrage non seulement un outil d'entraînement, mais aussi un support de réflexion plus générale.

L'ouvrage présente l'intérêt extrêmement précieux (et extrêmement risqué) de proposer une « réponse » détaillée, c'est-à-dire un corrigé qui permet de suivre pas à pas le raisonnement attendu. L'auteur a pris soin de détailler et de commenter certaines réponses lorsque des ambiguïtés peuvent se présenter. Les règles en usage au lycée concernant les chiffres significatifs n'ont pas toujours l'heur de plaire à l'auteur, mais c'est une chose qu'on lui pardonne bien volontiers tant les corrigés sont clairs et explicites.

S'agissant des niveaux de difficulté des exercices, ils sont très variables et, en ce sens, c'est un ouvrage qui convient mieux aux curieux ou aux enseignants qu'à un élève qui voudrait se préparer à un examen. Les résolutions peuvent en effet requérir l'utilisation de démonstrations mathématiques élaborées, du produit vectoriel, du calcul différentiel et intégral (équations différentielle et fonction exponentielle) ou de simples règles de proportionnalité. Il faut donc sélectionner les exercices en fonction du niveau d'étude recherché.

Mais avec un tel titre, est-ce vraiment ce qu'on attend d'un pareil ouvrage ? Le véritable enjeu et la grande prouesse de ce manuel est de plonger le lecteur dans la démarche intellectuelle du savant dont on suit la trace du raisonnement. Alors forcément, la contrainte des programmes scolaires passe au second plan et donne par conséquent à l'ensemble un

air de liberté intellectuelle, laquelle restitue un aperçu de celle dont les savants en question ont dû eux-mêmes user. Qu'il s'agisse des expériences de Pascal, des suites de Fibonacci ou de la théorie électromagnétique développée par Ampère en quelques semaines sur la foi des expériences d'Œrsted, on retrouve à travers les pages du livre de Jean-Marc Ginoux les traces d'une aventure intellectuelle qui ne peut que convenir à toute personne — élève, professeur ou simple curieux — désireuse d'éprouver, par le calcul, les difficultés aussi bien que la satisfaction des découvertes de l'esprit scientifique.

Cyril Verdet
Syrte – Observatoire de Paris

Philosophie des sciences

Gillett (Carl), *Reduction and Emergence in Science and Philosophy*. – First paperback edition. – Cambridge; New York; Melbourne : Cambridge University Press, 2018. – ix, 389 p. – 1 vol. broché de 15 × 23 cm. – £ 25.99. – isbn 978-1-107-42807-2.

L'ouvrage de Carl Gillett s'avère d'une grande pertinence malgré l'apparente étrangeté de la question de départ. L'auteur affirme, dès l'introduction, qu'il désire savoir si, parmi les diverses positions philosophiques et scientifiques sur l'émergence et la réduction, il en existe une ou plusieurs qui se rapprochent de la vérité concernant la nature de la composition scientifique et les positions actives, vivantes de notre époque (pp. 4-5). En d'autres termes, il cherche à déterminer si, grâce aux preuves empiriques que la science nous propose, il est possible de défendre clairement une position à propos de la structure de composition de la réalité. Toute entité macroscopique composée est-elle réductible à ses éléments fondamentaux ou bien existe-t-il des entités, des pouvoirs ou des processus qui ne soient pas réductibles, pour diverses raisons, et qui seraient par conséquent proprement émergents ? Il va également se demander si, parmi les nombreuses réponses apportées, certaines sont plus pertinentes et proches de la réalité que d'autres. C'est ici que l'étrangeté est la plus manifeste puisqu'il va opposer les visions scientifiques et philosophiques sur ces questions. Nous verrons que cela peut avoir son sens, mais le critère de spécification des visions n'est jamais clairement explicité. Qu'est-ce qui fait qu'une vision sera philosophique et l'autre scientifique ? La différence se situe-t-elle dans la méthode qui serait proprement disciplinaire ou dans la formation des personnes défendant ces opinions ? Nous pouvons comprendre au fil des exemples donnés par Gillett qu'il s'agit de la seconde solution, mais c'est toujours en supposant, en interprétant que l'on arrive à cette conclusion. Il n'affirme rien explicitement sur ce sujet et cela est assez déroutant puisque de cette opposition va naître une partie de son argumentation. De plus, le choix de la formation disciplinaire plus que de la nature de la méthode ou de l'attitude face à la question n'est pas forcément le plus évident. En effet, une scientifique qui se poserait des questions sur la composition du monde et l'existence de propriétés ou d'entités proprement émergentes n'aurait-elle pas par là une attitude philosophique — sans que l'on ne la considère pour autant comme philosophe ? La question est bien évidemment massive et ne constitue pas le cœur de l'entreprise de Gillett, mais elle laisse tout de même un goût particulier tout au long de la lecture et se rappelle sans cesse à la lectrice à chaque usage des termes « philosophique » et « scientifique ».

Cette distinction est d'autant plus étrange qu'elle semble développée en faveur de la posture scientifique, bien que Gillett lui-même soit philosophe. Cela part du constat, bien pertinent, que les philosophes des sciences sont restées pendant longtemps bien trop éloignées des pratiques scientifiques et des scientifiques elles-mêmes. Leur attitude surplombante n'a permis ni dialogue ni compréhension entre ces deux disciplines. Cela a mené à une incompréhension et une caricature des pensées et des pratiques scientifiques. Gillett trouve cela regrettable et souhaite, quant à lui, se rapprocher des sciences afin de rendre justice à leurs positions. Ce choix est tout à fait louable, mais il est légèrement assombri par la foi presque inébranlable de l'auteur dans la capacité des sciences à comprendre le réel et à atteindre la vérité. Il affirme d'ailleurs, et c'est l'une des thèses fortes qu'il défend dans cet ouvrage, que les sciences vont pouvoir trancher la question en apportant des preuves empiriques en faveur de l'une ou l'autre position : émergence ou réduction. Cette thèse cache un réalisme épistémologique fort — voire un scientisme — qui n'est jamais exposé clairement, ce qui est dommage. Au-delà de cela, il y a également une caricature assez forte de l'attitude philosophique qui le précède. Comme cité plus haut, Gillett reproche aux philosophes d'être enfermées dans leur tour d'ivoire et de critiquer des postures scientifiques qu'elles ne comprennent pas. Bien que cela puisse être en partie correct, l'auteur manque ici de nuances et regroupe toutes les philosophes dans le même sac. Ce n'est pas rendre justice aux multiples tentatives d'approche, de compréhension et de construction de ponts entre les deux disciplines qui, même si elles ne sont pas la norme, sont bien présentes dans l'histoire du débat.

Passé ces quelques remarques, nous pouvons nous pencher sur les aspects positifs et pertinents de ce travail. Le traitement qu'il fait de la question de départ relativement étrange se trouve être extrêmement judicieux et capable d'apporter une réflexion neuve à une question déjà maintes fois traitée. En se centrant sur ce qu'il considère être les positions vivantes et actuelles des scientifiques, il nous montre que les postures traditionnelles ne tiennent plus. Les connaissances changeant, plus personne, selon Gillett, ne défend un émergentisme ou un réductionnisme « de votre grand-mère » (p. 310). Maintenant, même les réductionnistes reconnaissent une forme d'existence aux entités (individus, propriétés, pouvoirs, processus) composées, de niveaux supérieurs. Une forme d'indépendance de ces entités est reconnue par rapport au niveau fondamental, ainsi qu'une importance réelle des sciences spéciales. Des réductionnistes radicales ne seraient peut-être pas d'accord avec lui, mais il affirme que leur posture n'est plus tenable. Il va alors proposer de nouveaux concepts permettant de saisir la réalité plus nuancée des opinions actuelles.

De son analyse et de la réactualisation des concepts et positions, Gillett va retenir trois visions qu'il va considérer comme viables : le fondamentalisme simple, le fondamentalisme conditionné et le mutualisme — les deux premières se rapprochant du réductionnisme et la dernière de l'émergentisme. Présentement, aucune de ces trois visions n'est confirmée ou infirmée par les pratiques scientifiques — contrairement aux cinq autres qu'il a développées et rejetées — ce qui assure, selon lui, leur viabilité. Gillett affirme ouvrir la voie à un nouveau travail, plus pertinent et plus proche de la réalité scientifique, qui reste en partie à réaliser.

L'apport de réflexions nouvelles et d'outils mieux adaptés pour discuter la question de la relation de composition du monde se trouve être précieux, même si l'on n'est pas

prête à accepter l'idée que la science pourra un jour y répondre. La rigueur avec laquelle Carl Gillett déconstruit les positions traditionnelles et en propose des originales est plus que bienvenue, mais c'est surtout l'audace des thèses qu'il défend qui constitue le véritable atout de l'ouvrage. Il confesse être attiré par l'option du mutualisme, et avec celle-ci, par la possibilité d'une émergence d'entités nouvelles, mais souligne tout de même que les deux versions du fondamentalisme sont également valables. Concernant le mutualisme, il va proposer une forme de causalité descendante, la détermination machrétique, ou *machresis* (p. 207), qui va lui permettre de répondre à la critique célèbre de Jaegwon Kim[1] concernant l'inconsistance de l'émergence. Selon ce dernier, le concept d'émergence est inconsistant, car il suppose une auto-détermination de l'entité émergente — elle serait d'une certaine manière sa propre cause. Cela est effectivement contourné grâce à la *machresis*, puisque celle-ci serait une détermination descendante, mais de nature différente de la détermination montante, qui elle produit l'entité émergente. La *machresis* est contraignante, et non productrice. C'est là une des idées les plus intéressantes et possiblement fructueuses du livre de Gillett. C'est également avec cela que le travail de Gillett dépasse la simple approche historique et critique — même si cette partie est déjà pertinente et consistante en elle-même — et s'élève vers la proposition théorique.

Pour conclure, nous pouvons dire qu'au-delà d'une approche assez technique — il faut être déjà rompue au domaine de la réduction et de l'émergence pour entrer dans la lecture de cet ouvrage — et la particularité du traitement de la problématique, le texte de Carl Gillett pose une pierre solide et utile à un édifice majeur de la philosophie des sciences. Il ne résout pas toutes les questions et en amène d'autres en ne justifiant pas certains choix qu'il opère, mais nous offre des outils pour avancer dans ce débat. Son travail cohérent et massif est à mettre dans les mains de toute personne qui souhaite rafraîchir ses idées sur l'émergence et la réduction et qui désire voir autrement leur relation[2].

Astrid Modera
Université de Namur

Wray (K. Brad), *Resisting Scientific Realism*. – Cambridge : Cambridge University Press, 2018. – 224 p. – 1 vol. broché de 15,5 × 23,5 cm. – £ 49,26. – isbn 978-1-108-41521-7.

L'opposition entre réalisme et antiréalisme traverse toute l'histoire de la philosophie des sciences et continue à faire couler beaucoup d'encre aujourd'hui. Ces deux conceptions ont pris, au fil du temps, des formes différentes à mesure que des arguments en faveur de l'une ou de l'autre position étaient proposés. Il est certain que bon nombre des avancées

1. Kim, J. (2014). *Trois essais sur l'émergence* (trad. M. Mulcey). Paris : Éditions d'Ithaque.
2. Je me suis permise, comme vous l'aurez sans doute remarqué, de suivre l'exemple de Carl Gillett en utilisant la forme féminine comme signe du neutre. Tout au long de son livre, il utilise systématiquement le pronom *she* et le déterminant *her* lorsqu'il présente la position et les arguments des philosophes et scientifiques hypothétiques, indéterminées, défendant les théories qu'il présente. L'invisibilisation des femmes dans la recherche et dans la société en général passant en partie par la structure de la langue, j'ai trouvé cette initiative pertinente et ai par conséquent décidé de la reproduire dans ce compte-rendu.

dans le domaine de l'épistémologie ont été provoquées par ces attaques et défenses successives.

Dans cet ouvrage, K. Brad Wray, professeur associé à l'Université d'Aarhus et spécialiste de Thomas Kuhn, se propose de défendre une position antiréaliste tout en dressant un état des lieux des débats contemporains sur cette question.

Dans sa forme, le livre se divise en deux parties bien distinctes : dans la première, on trouve un examen très complet des principaux arguments contre le réalisme et dans la seconde, Wray montre comment un antiréaliste peut répondre de manière satisfaisante à ces arguments.

Si l'auteur affirme que ce livre n'est pas une introduction ou une revue du sujet, mais bel et bien une contribution à la recherche actuelle en philosophie des sciences, il faut admettre que le texte prend souvent, principalement dans la première partie, la forme d'un exposé assez généraliste. Ce n'est pas forcément un défaut : le lecteur peu familier avec la manipulation des arguments régulièrement utilisés en philosophie des sciences pourra sans crainte comprendre les enjeux primordiaux de l'opposition réalisme/antiréalisme sans avoir à affronter trop de détails techniques ou logiques.

La première partie passe notamment en revue deux des grands arguments qui sont souvent opposés au réalisme : la sous-détermination des théories par l'expérience et l'induction pessimiste. Ces deux arguments visent à attaquer le point de vue réaliste selon lequel la précision et l'adéquation avec l'expérience des théories scientifiques actuelles nous permettraient de déduire qu'elles sont vraies ou, au moins, partiellement vraies.

L'argument de la sous-détermination se base sur l'idée qu'une expérience n'est jamais suffisante pour totalement rejeter ou totalement accepter une théorie. Sur ce point, Wray utilise un exemple historique très parlant : le modèle ptoléméen faisait des prédictions plus précises et mieux vérifiées par les observations astronomiques que le modèle copernicien, du moins à ses débuts. Or, nous avons aujourd'hui totalement rejeté le géocentrisme. On voit donc qu'une adéquation avec des données d'observations ne garantit pas la vérité de la théorie, contrairement à ce que le réaliste dépeint par Wray prétend.

L'argument de l'induction pessimiste, quant à lui, avance le fait que toutes les théories qui étaient largement acceptées dans le passé et qui sont maintenant abandonnées ont, elles aussi, eu leurs heures de gloire. Sur cette base historique, nous pouvons raisonnablement penser que nos théories actuelles subiront le même sort et seront à leur tour remplacées par des théories plus performantes. Nous n'avons donc pas de bonnes raisons de croire en leur vérité, à moins de postuler une sorte de privilège épistémologique des scientifiques actuels, privilège dont il faudrait alors expliquer la nature exacte. Sur la question de l'induction pessimiste, on pourrait par exemple mentionner Einstein qui, après avoir exposé sa théorie de la relativité générale, avait affirmé que le travail des plus jeunes physiciens était maintenant de prouver qu'il avait tort, comme il l'avait lui-même fait avec la théorie newtonienne.

Dans la deuxième partie, Wray part de l'incapacité du réaliste à répondre de manière satisfaisante à ces arguments pour montrer comment un antiréaliste peut prendre en compte, dans son explication du fonctionnement de la science, les remplacements succes-

sifs des théories, le succès jamais égalé de certaines de nos théories actuelles ou le fait que des théories fausses puissent être confirmées par de nombreuses expériences.

La principale force de l'exposé de Wray est l'articulation logique de ses arguments ainsi que la clarté de son exposé. Le recours à de nombreux exemples historiques — on a déjà évoqué la succession des modèles astronomiques, mais on peut aussi mentionner l'établissement du tableau périodique de Mendeleïev — qui illustrent le propos permet de s'éloigner des considérations purement abstraites tout en donnant du corps aux différents arguments présentés.

Il y a toutefois un point sur lequel le livre peine à pleinement convaincre. S'il est admis depuis le début qu'il s'agit d'une défense de l'antiréalisme, on ne peut que constater une asymétrie un peu exagérée qui finit par affaiblir l'ensemble de l'ouvrage. Par exemple, si les arguments utilisés sont tout à fait recevables, il semble qu'ils attaquent surtout une position réaliste quelque peu caricaturale. Les réalistes contemporains sont en effet très au courant de toutes ces justifications et je ne pense pas que l'on puisse encore trouver quiconque pour défendre sérieusement la position critiquée dans l'ouvrage.

On peut donc reprocher à Wray d'attaquer une forme déjà très affaiblie du réalisme, alors que des formes plus évoluées — on pensera par exemple au réalisme structural — sont discutées depuis déjà plusieurs années et apportent bon nombre de réponses aux lacunes pointées dans ce livre. C'est aussi pour cette raison qu'en tant qu'introduction générale à l'épistémologie, cet ouvrage semble un peu trop partial pour constituer un tour d'horizon satisfaisant, ce qui est dommage au vu de la clarté de l'exposé. On conseillera donc au novice en la matière de chercher des points de vue complémentaires. Quant aux personnes déjà familiarisées avec ces problématiques, elles trouveront à n'en pas douter, principalement dans la seconde partie, des éléments de réflexion pertinents.

Antoine Brandelet
Université de Mons

Sciences et religions

Hawking (Stephen), *Brèves réponses aux grandes questions* / traduit de l'anglais par Tania de Loewe. – Paris : Odile Jacob, 2018. – 240 p. – (Sciences). – 1 vol. broché de 14 × 20,5 cm. – 19.90 €. – isbn 978-2-7381-4567-3.

Le titre modeste de l'ouvrage de Stephen Hawking a valeur de clarification par rapport au précédent ouvrage écrit en collaboration avec Léonard Mlodinov qui prônait ouvertement l'athéisme. Il confirme les positions qui s'y expriment, mais en les plaçant dans une perspective plus large, c'est un document important pour voir la relation entre « science et religion » et pour cette raison pourra servir à l'historien des idées ou au sociologue.

Brèves réponses aux grandes questions commence par un témoignage personnel : « Je suis un scientifique. Un scientifique profondément fasciné par la physique, la cosmologie, l'univers et l'avenir de l'humanité » (p. 29). En écrivant « la physique théorique m'a permis d'aborder de grandes questions », il fait de la physique un moment dans une quête qui

relève de ce que l'on appelle traditionnellement « métaphysique ». Le chapitre se poursuit par une présentation personnelle de sa maladie (pp. 31-37) et ensuite de ses travaux scientifiques dont il souligne la valeur : « Nous avons résolu la plupart des grands problèmes de la théorie des trous noirs avant même que l'on ait les premières preuves observationnelles de leur existence » (p. 38). C'est là une clé de la philosophie immanente à ses travaux : le primat de la construction théorique sur les observations. Cette conviction préside à la publication des ouvrages qui ont fait de lui un homme médiatique : « J'ai eu l'idée d'écrire un livre grand public sur l'Univers (*Une brève histoire du temps*). [...] La vraie raison était que je voulais raconter où nous en étions dans notre compréhension de l'Univers, et que nous étions tout près de trouver une théorie complète décrivant l'Univers et tout ce qui s'y trouve » (p. 43). Le succès médiatique du livre montre que ce projet rejoignait un large public fasciné par les résultats de la cosmologie où affleurent des questions métaphysiques. Le présent ouvrage est, d'une certaine manière, la mise en ordre de cette démarche : pointer les questions présentes au cœur du travail scientifique, tant pour la méthode, la théorie ou les applications. Dix questions s'enchaînent : « Dieu existe-t-il ? Comment l'Univers a-t-il commencé ? Y a-t-il de la vie intelligence ailleurs ? Peut-on prévoir l'avenir ? Qu'y a-t-il à l'intérieur d'un trou noir ? Peut-on voyager dans le temps ? Les Terriens vont-ils survivre ? Faut-il coloniser l'espace ? Serons-nous dépassés par l'intelligence artificielle ? Que nous réserve l'avenir ? ». La méthode suivie dans la réponse procède d'un *a priori* rationaliste.

Lorsqu'il aborde la question de l'existence de Dieu, Stephen Hawking donne une définition de la religion comme « une tentative de répondre aux questions que nous nous posons tous : pourquoi sommes-nous là, d'où venons-nous ? ». La référence aux dieux est justifiée selon la tradition épicurienne qui voit dans la peur la source du sentiment religieux : « Comme le monde était un lieu effrayant, les gens [...] croyaient que des êtres surnaturels se cachaient derrière les phénomènes naturels comme les éclairs, les tempêtes ou les éclipses » (p. 49). Stephen Hawking voit dans la religion la marque de l'ignorance : si la science donne des réponses, « beaucoup, qui ne comprennent pas la science et n'ont guère confiance en elle, s'en remettent toujours aux rassurantes explications religieuses » (p. 49). Dans cet esprit, Stephen Hawking fait l'éloge d'Aristarque de Samos qui le premier a dédivinisé les astres et vu que « l'Univers est une machine gouvernée par des lois – lois qui sont accessibles à l'esprit humain » (p. 51). Il ajoute : « Si vous admettez comme moi que les lois de la nature sont éternelles, alors vous devez vous demander quel est le rôle de Dieu » (p. 51). Vient alors l'affirmation : « J'utilise le mot Dieu dans un sens impersonnel, comme le faisait Einstein, en lieu et place des "lois de la nature" » et il explicite : « Pour moi, la question de l'existence de Dieu est une question scientifique » (p. 52). Face à la question de l'origine de l'Univers, la réponse est cohérente avec sa définition de Dieu : « Je pense que l'Univers s'est créé spontanément à partir de rien en obéissant aux lois de la nature. » La suite vient immédiatement contredire ce propos, en parlant de ce rien : « Il semble qu'il suffise de trois ingrédients pour le créer, trois ingrédients pour une recette de cuisine cosmique. Alors quelles sont les trois choses nécessaires pour faire un univers ? La première est la matière – tout ce qui a une masse. [...]. Le deuxième ingrédient est l'énergie [...] Le troisième ingrédient pour faire un univers est l'espace. » Comme Stephen Hawking est conscient que c'est insuffisant, il poursuit : « D'où viennent la matière, l'énergie et l'espace ? » (p. 53). Après avoir noté qu'« on en avait aucune idée jusqu'au XXe siècle », il se réfère à la théorie du Big Bang considéré comme information sur un « commencement

absolu ». Cette notion, entendue littéralement, le conduit à ce constat circulaire : « Il n'y a rien avant le Big Bang car le temps n'existait pas encore. Nous voilà enfin avec une chose qui n'a pas de cause, puisque la notion de cause n'a pas de sens de sens hors du temps. Pour moi, cela implique qu'il ne peut pas y avoir de créateur : il n'y a pas de temps dans lequel il aurait pu exister. » (p. 60) Ainsi la question de Dieu est vaine !

La question suivante (« Comment l'Univers a-t-il commencé ? ») est l'occasion d'un exposé de la théorie dite Big Bang dont la présentation est attribuée à Einstein. Il est étrange qu'Einstein soit considéré comme l'inventeur de ce modèle, alors qu'il l'a récusé lorsque son « premier inventeur » (Georges Lemaître) lui a présenté ses travaux. Évoquer cet épisode aurait conduit à voir la différence entre conceptualisations scientifique et philosophique.

Les questions suivantes traitent de l'exploration du cosmos. Elles ouvrent logiquement sur des questions d'actualité. Certaines sont scientifiques : l'intérieur d'un trou noir, le voyage dans le temps… D'autres sont sociopolitiques : la survie des Terriens, la colonisation de l'espace et l'avenir. On y voit paraître dans ces analyses l'importance des notions d'aléatoire et d'imprévisible. Ce point, qui aurait demandé un examen théorique, n'est relevé que comme un fait qui invite à la modestie sur les prévisions et les constructions théoriques en contraste avec l'ambition affirmée à propos de la connaissance de l'origine du monde. La vie est réduite à la fonctionnalité, celle d'un « système ordonné qui se maintient contre la tendance généralisée au désordre et est capable de se reproduire » (p. 87). D'autres questions sont plus immédiatement anthropologiques en ce sens qu'elles posent la question de l'intelligence : celle de la « vie intelligente ailleurs », mais aussi de l'intelligence artificielle. Cette étude ouvre sur une définition de l'intelligence. Là encore la vision est réductrice : « Je pense qu'il n'y a pas de différence qualitative entre le cerveau d'un ver de terre et un ordinateur. Et l'évolution a fait qu'il n'y en a pas non plus entre le cerveau d'un ver de terre et celui d'un homme » (p. 191). Stephen Hawking voit alors poindre la peur de voir la machine ou le système prendre le pouvoir ; il fait une mise en garde : « Notre avenir sera une course entre la technologie et la sagesse. Assurons-nous que la sagesse gagnera » (p. 201), mais hélas la notion de sagesse n'est pas définie de manière claire. Tel est sans doute le point aveugle du livre : l'intelligence n'est que puissance de calcul. S. Hawking ne soupçonne pas la richesse exprimée par le terme « esprit » dans la tradition dont il est l'héritier.

Les questions posées restent dans le champ d'une philosophie dont le trait caractéristique peut être appelé le réductionnisme : Toute chose ou phénomène s'explique par l'agencement de ses éléments constitutifs et l'unité n'est jamais posée comme principe d'être. La philosophie de l'émergence est ici souveraine, à partir du modèle standard qui présente la formation de l'univers par analogie avec la théorie de l'évolution des vivants et de l'humanité. Cela conduit vers une inquiétude renouvelée. Ainsi la boucle est bouclée. La religion est définie à l'origine comme née de la peur ; elle est rejetée au nom du savoir conquérant de la science ; mais celle-ci prend sa place et se trouve elle aussi face à l'imprévisible qui fait peur. La solution proposée est la colonisation d'espaces nouveaux, sans soupçonner ce qu'a de désespérant ce passage du pareil au même.

Jean-Michel Maldamé
Couvent des Dominicains (Toulouse)

Jahae (Raymond), *Von der Formel zum Sein : Der Wahrheitsanspruch des Christentums angesichts der Herausforderung durch die Naturwissenschaft in der Diskussion der Gegenwart*. – Würzburg : Echter Verlag, 2018. – 437 p. – (Religion in der Moderne ; 27). – 1 vol. broché de 15 × 23 cm. – 42,00 €. – isbn 978-3-429-04468-8.

Écrit par Raymond Jahae, prêtre, docteur en philosophie et docteur en théologie, ce livre aborde le problème posé par la confrontation entre la revendication d'une vérité des contenus de la foi chrétienne (création, finalité, existence de l'âme, liberté de l'Homme, etc.) et les remises en question issues des sciences contemporaines de la nature (cosmologie, théorie de l'évolution, etc.).

Dans une première partie, l'auteur esquisse un panorama historique concis des relations entre la foi chrétienne et les sciences de la nature, depuis l'Antiquité jusqu'à nos jours.

Ensuite, dans une deuxième partie, il donne des exemples actuels de la manière dont sont abordées ces relations, en étudiant la pensée de quatre auteurs. Michael Heller, cosmologiste, philosophe des sciences, théologien et membre de l'Académie pontificale des sciences, Hans-Dieter Mutschler, philosophe de la nature, Thomas Nagel, célèbre philosophe analytique, et Bela Weissmahr, philosophe jésuite, influencé par l'École de Joseph Maréchal (thomisme transcendantal). Le choix des auteurs est ici original et intéressant, car il rend bien compte des différentes positions et discussions sur les rapports « sciences-théologie ».

Finalement, les analyses des deux premières parties conduisent Raymond Jahae à un troisième moment de sa réflexion dans lequel il soutient que les résultats des sciences de la nature ne touchent pas les contenus de la foi. Pour comprendre les affirmations sur Dieu et la création, formulées par les philosophes ou scientifiques qu'il a convoqué, une réflexion métaphysique s'impose réfléchissant sur les conditions de possibilité de l'existence des étants.

Cet ouvrage est très intéressant. Il redonne une place à une véritable et profonde réflexion métaphysique qui souvent manque au sein des études actuelles sur les rapports entre sciences et foi chrétienne. On pourrait cependant se demander s'il est légitime, philosophiquement, d'immuniser complètement les sciences de toute portée métaphysique. Les sciences sont peut-être porteuses, en creux, d'une profonde « charge ontologique », d'une « métaphysique en esquisse » dont les traits indiqueraient un horizon qui, quant à lui, ne pourrait être atteint que par une authentique métaphysique non réductible aux sciences. La « forme » exhibée par les lois de la nature pourrait peut-être révéler quelque chose de « l'être », par la médiation d'une articulation, légitimement fondée, évitant tout concordisme réducteur.

Le livre a le grand mérite d'ouvrir à un débat, par-delà les positions naïves et réductrices concernant les relations entre sciences et religions, que l'on peut lire aujourd'hui, y compris sous la plume de grands scientifiques ou philosophes.

Dominique Lambert
Université de Namur

THAYSE (André), *Science, foi, religions : irréductible antagonisme ou rationalités différentes ?* / avec la collaboration de Marie-Hélène THAYSE-FOUBERT ; préface de Jacques NEIRYNCK. – Louvain-la-Neuve : Academia-L'Harmattan, 2016. – 162 p. – (Sciences et enjeux ; 7). – 1 vol. broché de 13,5 × 21,5 cm. – 16,50 €. – isbn 978-2-8061-0304-8.

Cet ouvrage, dont les deux membres de l'alternative donnée en sous-titre renvoient respectivement aux points de vue de Jean Bricmont et d'Henri Atlan, est composé de deux parties totalement indépendantes : l'une, intitulée « Science et foi », plaide pour l'ouverture des sciences exactes aux autres formes de pensée dès lors que la démarche scientifique ne suffit pas à épuiser le réel ; l'autre, titrée « Évangile et religion », opère une confrontation (plus courte) entre les textes fondateurs du christianisme et la religion chrétienne. C'est bien sûr la première qui retiendra exclusivement notre attention.

Tributaire de l'interprétation de la mécanique quantique délivrée par Bernard d'Espagnat qui constitue son unique point de référence en la matière[1], partisan de ce qui est en réalité une conception phénoménaliste de la science, adepte de la distinction entre une « réalité empirique » et une « réalité en soi » inaccessible à la démonstration scientifique, mais dont l'existence est hautement probable, l'auteur cherche à montrer ou du moins à suggérer : 1°) que cette distinction est pertinente ; 2°) que le dévoilement de cette réalité en soi n'est que partiellement opéré par la science (seulement susceptible de nous dire ce qu'elle n'est pas), de sorte qu'il convient de faire appel à des rationalités différentes pour poursuivre ce dévoilement ; 3°) que cette réalité en soi, située hors de l'espace et du temps, cause de tout ce qui existe dans la réalité empirique et indépendante de notre existence, peut être mise, par ses caractéristiques, dans une relation d'analogie avec le Dieu des chrétiens ; 4°) qu'à la distinction « scientifique » entre réalité empirique et réalité en soi correspond la distinction religieuse entre « Dieu de notre côté » et « Dieu de son propre côté ».

S'il paraîtra à certains suggestif et s'il a le mérite d'aborder des questions extrêmement profondes et délicates, cet ouvrage, qui avec sincérité mais sans doute naïveté met tous ses espoirs dans la mécanique quantique, semble méconnaître à quel point il est dangereux de se rendre tributaire d'une théorie scientifique, nécessairement passagère, et à quel point il est important non seulement de maîtriser en profondeur les sciences, la philosophie et la théologie, mais encore d'avoir intensément réfléchi à la manière de les articuler.

JEAN-FRANÇOIS STOFFEL
Haute école Louvain-en-Hainaut

Sciences et société

Ce que la science sait du monde de demain : intelligence artificielle, transhumanisme, menace climatique, surpopulation… Notre vie en 2050 / sous la direction de Jim AL-KHALILI ; tra-

1. En l'occurrence ses ouvrages *Un atome de sagesse : propos d'un physicien sur le réel voilé* (1982), *Le réel voilé : analyse des concepts quantiques* (1994) et enfin *Traité de physique et de philosophie* (2002), auxquels vient s'ajouter *Regards sur la matière : des quanta et des choses* écrit en collaboration avec Étienne Klein.

duit de l'anglais par André Cabannes et Lionel Pousaz. – Lausanne : Presses polytechniques et universitaires romandes, 2018. – 336 p. – (Quanto). – 1 vol. broché de 14 × 20,5 cm. – 18,50 €. – isbn 978-2-88915-240-7.

De tous temps, l'Homme a cherché à connaître son futur : oracles, devins, prophètes pullulent dans toutes les sociétés. Dans son domaine, le scientifique échantillonne, examine, décrit, expérimente, analyse, discute les résultats et interprète. Ses conclusions sont, à divers degrés, considérées comme une base de discussion dans les prises de décision : les travaux du GIEC (Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat) demeurent une base de travail pour les (non) décisions du futur. Mais le scientifique est-il capable de prévoir les contours de la société du futur ? Est-il crédible et légitime pour le faire ? Vaste débat qui nous amène souvent à des positions variées, entre implication concrète des scientifiques dans la société et devoir de réserve, en passant par la « nécessaire neutralité ». Les prédictions quant à la façon dont les progrès de la science et de la technologie affecteront nos vies couvrent un vaste registre, depuis le certain jusqu'au totalement hypothétique. Imaginiez-vous, il y a 20 ans, pouvoir être connecté en permanence, retrouver votre chemin sans une carte-papier, recevoir l'intégralité de votre ADN, discuter de panneaux solaires et d'éoliennes, … ? Bien des domaines sont concernés. Le titre complet de l'ouvrage dresse quelques sujets potentiels : *Ce que la Sciences sait du monde de demain : intelligence artificielle, transhumanisme, menace climatique, surpopulation… Notre vie en 2050.*

Après une introduction concise, l'ouvrage s'articule en cinq chapitres : « L'avenir de notre planète », « L'avenir de l'humain », « L'avenir en ligne », « Créer l'avenir » et « L'avenir lointain ». Chaque chapitre contient quelques sous-chapitres, chacun écrit par un expert mondial, scientifique spécialiste dans son domaine.

« L'avenir de notre planète » traite de démographie, biosphère et changement climatique. Cela commence par quelques prédictions catastrophiques : « actuellement 750 millions de personnes n'ont pas accès à l'eau potable […] elles pourraient être au nombre de trois milliards en 2025 » (p. 17). On pourrait d'emblée considérer cela comme une prophétie de malheurs, l'annonce de l'effondrement de la civilisation et de la fin du monde. N'est-ce pas plutôt un défi politique et technologique à relever ? Le scientifique étaie ses hypothèses, ses résultats et ses interprétations. Il propose ensuite un constat, voire propose des pistes de solutions : « il s'agit plutôt d'un rappel de ce que devront être nos priorités à l'avenir. Certes la médecine personnalisée, les robots intelligents, l'exploitation minière des astéroïdes et la régénération d'organes sont des sujets passionnants (ou effrayants, selon le point de vue). Mais la disparition des besoins essentiels de l'humanité […] n'est pas pour demain » (p. 17). Là est sans doute l'atout subtil de l'ouvrage : à côté des prédictions, peut-être vraies, sans doute fausses, le lecteur envisage ses priorités dans son futur mode de vie. Il lui faudra boire et manger, être en bonne santé, sûrement aimer, vraisemblablement rire, épisodiquement s'émerveiller… Il fera tout le reste si son futur le permet…

« L'avenir de l'humain » s'intéresse à l'avenir de la médecine, de la génomique et de l'ingénierie génétique, à la biologie de synthèse et au transhumanisme. En médecine, il est certain que, même en améliorant nos défenses face aux maladies actuelles, d'autres maux viendront les remplacer. De nouvelles idées, approches inédites, recherches originales à l'échelle mondiale permettront de relever le défi. « En définitive, notre salut dépendra de

l'interconnexion mondiale et de la collaboration qui en résultera » (p. 89). Et cela, quel que soit le futur annoncé !

« L'avenir en ligne » envisage notre monde connecté : cloud, internet des objets, cybersécurité, intelligence artificielle et ordinateurs quantiques. Cela facilitera notre vie et générera des avancées significatives dans de nombreux domaines, y compris en médecine. Cela est-il nécessaire ? Chacun aura son avis : « l'intelligence artificielle [...] sera omniprésente et incontournable » (p. 177), selon l'expert consulté... Préparons-nous donc ! Dans les années 1980, les ordinateurs commençaient juste à être des objets utilisés dans des cercles circonscrits. À cette époque, pas de distributeurs de billets, pas de smartphones, pas d'internet. De nombreuses tâches quotidiennes qui, aujourd'hui, semblent aller de soi n'existaient pas. De nos jours, les ordinateurs conventionnels sont partout : ils ont bouleversé nos vies. Les scientifiques et les responsables politiques ont inventé un qualificatif pour les technologies qui bouleversent nos vies : on les dit « disruptives ». Les ordinateurs ont radicalement et rapidement transformé nos vies. Il semblerait que les ordinateurs « quantiques », nouvelle version informatique, soient amenés à un futur similaire...

Le chapitre « Créer l'avenir » se focalise sur les matériaux intelligents, l'énergie, les transports et la robotique. Les objets autour de nous seront capables de sentir, bouger, réagir, s'adapter, changer de forme. L'énergie, service de base pour certains d'entre nous, est déjà un défi pour beaucoup d'humains sur la planète. À l'avenir, une certitude : notre relation à l'énergie va évoluer. La recherche d'une énergie *illimitée et propre* sera (est) un défi majeur ! Sans doute est-ce le chapitre dans lequel l'expert est le moins enclin aux certitudes, tant les incertitudes sont nombreuses, les voies multiples. Par ailleurs, bougerons-nous en véhicules autonomes ? Nos relations avec les robots seront-elles augmentées ? Si oui, comment ?

Dans un évident souci de continuité temporelle, le dernier chapitre dresse les grandes lignes des voyages interstellaires, de la colonisation du système solaire, avant de conclure par l'apocalypse et la téléportation dans le temps. Science-fiction ou réalité ? En 1968, dans *2001, l'Odyssée de l'espace*, S. Kubrick décrivait-il correctement le monde futur ? Sans doute que marcher sur la lune, au début du XXe siècle, demeurait inenvisageable...

La quatrième page de couverture du livre conclut en toute modestie : « L'avenir, imprévisible par principe ? Détrompez-vous. Les scientifiques savent déjà à quoi ressemblera notre monde en 2050 ». Heureusement, le conditionnel, gage du nécessaire doute, est souvent utilisé dans le livre. Seule certitude : on aimerait être présent en 2050, un brin nostalgique (?), livre en poche ou tablette quantique à la main, pour vérifier tout cela...

Johan Yans
Université de Namur

Kaku (Michio), *L'avenir de l'humanité : terraformage de Mars, voyages interstellaires, notre destinée en dehors de la Terre* / traduction de Paul Depovere. – Louvain-la-Neuve : De Boeck Supérieur, 2019. – 384 p. – 1 vol. broché de 16 × 24 cm. – 20,00 €. – isbn 978-2-8073-2232-5.

Cette traduction de *The future of Humanity : Terratransforming Mars, Interstellar Travel, Immortality, and our Destiny beyond Earth* (Doubleday, NY, 2018) nous transporte dans le futur afin de « quitter la Terre, voyager vers les étoiles, chercher la vie dans l'Univers » de Michio Kaku. C'est un physicien (un des auteurs de la théorie des cordes), diplômé de Harvard. Il nous initie à son interrogation sur la façon dont l'humanité doit se préparer à quitter la Terre et à développer une nouvelle civilisation dans l'espace, avec pour premier objectif Mars, voire ensuite le franchissement de notre système solaire.

Des hommes ont quitté la Terre pour la première fois il y a 50 ans, l'occasion pour Michio Kaku, physicien de formation, spécialiste de la théorie des cordes, mais aussi futurologue, de s'interroger sur la façon dont l'humanité doit se préparer à quitter la Terre. Il annonce même : « Nous devons sérieusement envisager devoir un jour nous échapper de notre planète ou disparaître » (bande-annonce). Dans une première étape, il se pose les questions : comment les recherches avancées en robotique, en nanotechnologie et en biotechnologie nous permettraient-elles de terraformer et de construire des villes sur Mars ? (chap. 5) et pouvons-nous, ensuite, aller au-delà des frontières de notre système solaire ? (chap. 6).

Micho Kaku avait 22 ans en 1969 : il appartenait à l'armée américaine et s'entraînait dans l'infanterie, attendant un éventuel ordre pour combattre au Vietnam. Il introduit son ouvrage par une série impressionnante de remerciements : plus de 200 pionniers et précurseurs, dont 12 lauréats du prix Nobel, mais un seul des 12 marcheurs sur la Lune. Ces pionniers et précurseurs sont des astronomes, chimistes, futurologues, généticiens, informaticiens, médecins, physiciens, psychiatres, vulcanologues, ... mais aussi des écrivains, éditeurs de revues et politiciens. Il consacre les 50 premières pages à l'histoire de la conquête spatiale avec un point de vue plus politique et économique que scientifique ou technique. Puisque la Lune est notre plus proche voisine dans l'espace, il s'intéresse à elle comme destination de voyage à titre privé (il en évoque le coût et la préparation nécessaire !), puis comme base permanente pour aller plus loin. Il nous propose d'abord une description physique de l'origine et de l'évolution de notre satellite naturel. Viennent ensuite des informations sur l'exploitation minière du sol lunaire et des astéroïdes.

Aller plus loin, c'est obligatoirement tenter d'abord d'atteindre Mars et citant Buzz Aldrin : « Mars est là, attendant qu'on y mette le pied ! » (p. 79). Un projet qu'il choisit pour cette destination est celui d'Elton Musk, créateur de SpaceX, pour qui le but final est de « réduire le risque de l'extinction humaine en créant une vie multi-planétaire par l'établissement d'une colonie humaine sur Mars » (p. 79). Kaku tempère pourtant cet optimisme en signalant les multiples difficultés : comment prévenir les défaillances (il y en eut pas mal lors des expéditions lunaires) d'autant que le choix du type de fusée pour y aller n'est pas encore décidé et que l'assemblage de la fusée pour le retour (dans une station spatiale autour de la Lune ?) n'est pas prévu avant 2026. Comment d'autre part les organismes pourront supporter la durée de ce voyage en apesanteur ?

Au chapitre suivant, nous vivons sur Mars : « un jardin planétaire », on y fait du sport, on cultive pour se passer d'être approvisionné par les terriens. Utilisant les propositions de la science-fiction, mais aussi nos connaissances du sol et du sous-sol de Mars, Kaku aborde alors le terraformage (ou terraformation), une science qui étudie la transformation

de l'environnement naturel de cette planète afin de la rendre habitable, en réunissant les conditions d'une vie semblable à celle que nous connaissons sur terre. Après une éventuelle découverte de la vie sur Mars, ou après l'avoir importée, pourquoi pas rêver à pouvoir aller au-delà ? D'abord sur les lunes de Jupiter, ensuite sur celles d'Uranus et de Neptune ou sur une comète ? Kaku nous promène ainsi dans le système solaire à la lumière des informations qui nous sont fournies par les sondes spatiales. Nous achevons ici de lire le sixième chapitre d'un ouvrage qui en comporte 14 !

Dans les trois chapitres suivants, Kaku nous propulse vers les étoiles. Se référant toujours aux films de science-fiction, pas seulement ceux qui nous envoient vers des sites lointains, mais aussi ceux qui nous invitent à un « voyage au centre de la mémoire ». Il se base ici sur *Total Recall*, sorti en 1990, où le héros (incarné par Arnold Schwarzenegger) accepte de subir une transformation de son cerveau pour lui permettre de réaliser son rêve : vivre sur Mars. C'est l'occasion de nous introduire à l'intelligence artificielle, de penser à la création de robots superpuissants (qui risquent sans doute de devenir incontrôlables) et de machines apprenantes (dotées d'une autoconscience ?). La réalisation de ces rêves d'évasion passe par la conception de vaisseaux et de fusées d'un type nouveau (fusées à fusion nucléaire ? fusées à antimatière ?). Rien que ça ! Toutes ces étapes donnent l'occasion à l'auteur de faire allusion aux notions qu'il utilise dans son activité de physicien : trous de ver, équations d'Einstein, effet Casimir. Pour terminer cette deuxième partie, Kaku nous invite à méditer la citation de Nikola Tesla : « Le désir de connaître des choses à propos de nos voisins dans les étendues immenses de l'espace ne découle pas d'une curiosité gratuite ni d'une soif de savoir, mais bien d'une motivation plus profonde. Il s'agit en fait d'un sentiment solidement ancré dans le cœur de chaque être humain pour autant qu'il soit tout simplement capable de réfléchir. » (p. 187). Cette réflexion porte sur des questions comme : existe-t-il des systèmes solaires autres que le nôtre ? Comment détecter des exoplanètes ? Où sont les autres mondes habitables ?

Toutes ces spéculations nous amènent à imaginer la « vie dans l'Univers » avec pour idée directrice l'apophtegme de Sir Martin Rees (cosmologiste et astrophysicien anglais) : « Les siècles qu'impliquerait une traversée de notre Galaxie ne seront pas insurmontables pour des êtres immortels » (p. 205). Aborder l'immortalité passe par la manière de retarder le vieillissement, mais *quid* alors de la surpopulation si on visait à rendre les hommes immortels ? Ce sont des thèmes que Kaku a développés dans diverses émissions en radio et télévision. Il discute en particulier de l'immortalité numérique qui résulterait d'une numérisation du cerveau.

Pour augmenter nos performances, il faudra penser transhumanisme : mouvement culturel et intellectuel prônant l'usage des sciences et des techniques afin d'améliorer la condition humaine par l'augmentation des capacités physiques et mentales. Pour y parvenir, faut-il modifier notre ADN ? Faut-il chercher à éliminer les gènes létaux ? Les aspects éthiques de ces pratiques conduisent à d'importantes controverses.

Moins polémique est la recherche d'une vie extraterrestre avec les télescopes les plus puissants afin de saisir les transmissions éventuelles émanant de civilisations extraterrestres, même plus avancées que la nôtre. Peut-on envisager le portage par laser vers les étoiles, les voyages à vitesse supraluminique ? À la fin de son ouvrage, Kaku revient sur ses activités de

physicien théoricien et nous parle du flou quantique, de la théorie des cordes, de l'hyperespace, de la matière noire.

La dernière citation de Stephen Hawking s'inscrit dans les espoirs de Michio Kaku : « Notre seule chance de suivie à long terme n'est pas de nous voiler la face sur notre planète Terre, mais d'atteindre l'espace… Mais je reste optimiste. Si nous réussissons à éviter un désastre durant les deux siècles à venir, notre espèce sera en sécurité pour autant que l'on se disperse dans l'espace. Dès l'instant où nous y aurons établi des colonies indépendantes, notre avenir tout entier sera assuré » (p. 335).

Pour passer du rêve à la réalité, le premier effort ne devrait-il pas venir des généticiens pour allonger la vie moyenne des humains d'un ordre de grandeur ! Mais avons-nous le droit de nous engager dans pareille démarche ?

Guy Demortier
Université de Namur

Battu (Daniel), *L'histoire et l'économie du monde accompagnées par les TIC*. – Londres : ISTE éditions, 2018. – 220 p. – (Histoire des sciences et des techniques). – 1 livre électronique. – 9,90 €. – isbn 978-1-78406-366-5.

Ce livre se veut un cri d'alarme. En effet, dès l'avant-propos, l'auteur, consultant en réseaux et en technologies de l'information, pose la question suivante : « Qui aujourd'hui, dans ce monde en désordre, qui dispose pourtant d'un réseau de communication unifié et performant, peut faire entendre la voix du bon sens et ramener à la raison les acteurs économiques inconscients et divisés ? » (p. 14).

Dans son introduction, Battu précise que sa démarche « consiste à procéder à l'analyse des faits marquants de l'histoire de l'information et de la communication afin de mettre en évidence leurs caractéristiques immuables dominantes » (p. 17).

Dans le premier chapitre, le consultant retrace, entre autres, l'histoire du langage puis de l'écriture et celle des bibliothèques. Puis, il évoque le passage de l'analogique au numérique. Ensuite, il tente de relever certaines constantes et aussi certaines limitations des TIC.

Le chapitre suivant a pour thème : « Les TIC à travers l'histoire ». Il est subdivisé en dix paragraphes, respectivement qualifiés comme suit : « Les dynamiques sous-jacentes », « Savoirs et économie », « Élitisme », « La vie sociale face aux diversités », « Évolution des métiers », « L'innovation, une démarche constante de l'Humanité », « Distribution des richesses au cours du temps », « La révolution industrielle », « Le mythe de l'équilibre par la réglementation », « Les constantes relevées » (cf. table des matières, p. 7).

Le chapitre 3 passe en revue et commente les innovations récentes apportées par les TIC. C'est ainsi qu'il décrit de façon très intéressante, notamment, les plateformes informatiques. Il évoque aussi des nouveautés qui se profilent. Et il « se termine par un bilan et une liste de souhaits de réalisations supposées capables de résoudre les contradictions sociales de ces innovations » (p. 18).

Dans le chapitre 4, Battu commence par analyser les rapports entre le numérique et la mondialisation. Ensuite, il détaille l'état actuel du numérique selon différentes localisations : l'Europe, l'Afrique, la Chine (en 8 pages passionnantes), l'Inde et la Russie.

Le dernier chapitre concerne « La problématique des TIC ». L'auteur en propose lui-même la synthèse suivante : « La mondialisation des échanges et la couverture mondiale d'Internet imposent des décisions d'ordre technique et réglementaire qui devraient être mises en œuvre de façon urgente et concertée » (p. 19). Pour justifier cette affirmation de Battu, je me permets d'épingler ici le détail de ses préoccupations que je trouve percutantes : « La disponibilité de fonds financiers sans affectation, de taux d'intérêt très bas, la concurrence entre de nombreuses unités de recherche, font que probablement des projets frisant l'utopie sont pris en considération par des investisseurs irresponsables. La science ne peut pas permettre de réaliser les rêves les plus fous. La mission des technologies devrait se focaliser en priorité sur les solutions des problèmes les plus urgents, dont ceux liés à l'aide aux plus démunis, à la réduction de l'inégalité entre les citoyens, à la survie de l'espèce humaine sans dégradation de la planète et à une meilleure connaissance de notre monde » (p. 180). Je note aussi l'importance potentielle accordée par Battu à l'Unesco : selon l'auteur, cet organisme a, en effet, « un rôle complémentaire à jouer dans le renforcement des fondations pour une paix et un développement équitable et durable. [...] Il semblerait nécessaire que l'Unesco ait, de par sa mission générale, vocation à intervenir auprès des instances de normalisation [...] » (pp. 184-185).

Ce livre présente de grandes qualités pédagogiques : il est très structuré et pourvu de précieux outils, tels que des annexes (avec notamment des tableaux récapitulatifs) et un glossaire. Mais il est, me semble-t-il, plus propice à la consultation ou à l'accompagnement d'un cours magistral (dont il pourrait d'ailleurs être le syllabus) qu'à une lecture continue et suivie. D'autre part, la façon dont l'ouvrage est structuré me paraît améliorable. (À titre informatif, j'ai délibérément repris ci-dessus les subdivisions du chapitre 2 : au lecteur donc de se faire une opinion personnelle à ce sujet.)

Par ailleurs, le texte est très bien documenté en ce qui concerne les réseaux de télécommunications et les événements actuels ou appartenant à un passé proche. En revanche, il est plus faible au niveau de l'histoire plus ancienne (cf. notamment chapitres 1 et 2), ne recourant à ce sujet qu'à des références peu nombreuses et généralement peu récentes. Il contient même une grossière erreur lorsqu'il affirme que « l'être humain s'est campé sur ses deux jambes » il y a seulement 300.000 ou 50.000 ans (p. 21). *Homo erectus* qui a émergé il y a environ deux millions d'années était, en effet, déjà doté d'une bipédie exclusive parfaite. Il est vrai que Battu lui-même plaide coupable dans son avant-propos : « Compte tenu de l'ampleur du thème, l'auteur compte sur l'indulgence du lecteur » (p. 14).

Marie d'Udekem-Gevers
Université de Namur

Mathématiques

COLLION (Stéphane), *Voyage dans les mathématiques de l'espace-temps : trous noirs, big-bang, singularités*. – Les Ulis : EDP sciences, 2019. – 208 p. – (Une introduction à). – 1 vol. broché de 17 × 24 cm. – 29,00 €. – isbn 978-2-7598-2279-9.

Depuis 2015, la relativité générale a connu un formidable regain d'intérêt, dans la communauté scientifique, mais également dans les médias généralistes, avec la détection expérimentale des ondes gravitationnelles et la captation de la première image d'un trou noir par les expériences LIGO et *Event Horizon Telescope* respectivement. Il est dès lors compréhensible que des auteurs contemporains s'essaient à vulgariser cette théorie : Stéphane Collion en fait partie et nous propose un *Voyage dans les mathématiques de l'espace-temps : trous noirs, big-bang, singularités*.

Pour tout physicien désireux de présenter un pan de cette science au grand public se pose une question à résoudre d'emblée : quelle place donner aux mathématiques ? En effet, si la mécanique newtonienne fait majoritairement appel à des outils « classiques » — rencontrés dans un parcours scolaire scientifique —, les développements du XXe siècle font intervenir des concepts beaucoup moins répandus (tenseurs, formes différentielles, etc.). La plupart des ouvrages de vulgarisation consacrés à la physique moderne omettent les formules mathématiques, ce qui, on le comprend, est une source de frustration pour leurs auteurs : ne ment-on pas au public en lui cachant ce qui constitue le cœur de la physique ? La consolation viendra de ce qu'en se focalisant plutôt sur des aspects graphiques ou sur des analogies pertinentes, un nombre maximal de lecteurs pourra tirer du texte l'information souhaitée et un enrichissement intellectuel. Stéphane Collion, pour sa part, a choisi une autre option : « [...] je n'ai pas cherché à cacher les formules... Je trouve cela malhonnête » (p. v), déclare-t-il dans l'avant-propos. Le pari est risqué : l'auteur et le lecteur en sortent-ils gagnants ?

Voyage dans les mathématiques de l'espace-temps débute par une indispensable introduction à la relativité restreinte, abordée sous l'angle du calcul vectoriel et de la représentation dans un diagramme d'espace-temps de nombreux phénomènes au parfum de science-fiction (dilatation des temps, contraction des longueurs, perte de la simultanéité, etc.). Cette approche graphique est élégante et réussie. Tout au plus peut-on regretter un manque d'uniformité dans les notations : le symbole . désigne aussi bien le produit usuel entre deux nombres que le produit scalaire en espace euclidien ou de Minkowski, et la norme d'un vecteur est notée tantôt $|\vec{v}|$ tantôt $\|\vec{v}\|$. Cette multiplication des conventions d'écriture peut rapidement introduire de la confusion chez les lecteurs les moins familiers avec les mathématiques. Mentionnons en complément d'information les premiers chapitres d'un ouvrage tel que celui de C. Semay et B. Silvestre-Brac (*Relativité restreinte*, Dunod, 2016), adoptant la même approche que S. Collion, mais de manière plus précise et détaillée.

La relativité générale vient ensuite, accompagnée d'une introduction à la géométrie riemannienne qui en constitue la base formelle. Sont plus spécifiquement abordées, dans la deuxième moitié du texte, les fascinantes solutions de l'équation d'Einstein que sont les trous noirs, l'Univers en expansion et le big-bang, ainsi que les trous de vers. S. Col-

lion se risque même à aborder les fameux théorèmes de singularité de Penrose et Hawking, montrant de manière générale, grâce à des outils topologiques, que l'existence de ce type de singularités n'est pas un artifice mathématique, mais bien une propriété inhérente à la relativité générale. La démarche est ambitieuse, mais, malheureusement, se heurte à la complexité des outils mathématiques, malgré tout bien trop grande pour un texte destiné au grand public. Pour rester fidèle à son principe d'honnêteté intellectuelle, S. Collion est amené à écrire des phrases pour le moins déroutantes. Un exemple résume parfaitement l'impasse dans laquelle cet ouvrage emmène son lecteur (figure 4.14) : « Pour se donner une idée de la complexité de la courbure, voilà sa "formule" dans une carte :

$$R^{\alpha}_{\beta\mu\nu} := \frac{\partial \Gamma^{\alpha}_{\beta\nu}}{\partial x^{\mu}} - \frac{\partial \Gamma^{\alpha}_{\beta\mu}}{\partial x^{\nu}} + \Gamma^{\alpha}_{\sigma\mu}\Gamma^{\sigma}_{\beta\nu} - \Gamma^{\alpha}_{\sigma\nu}\Gamma^{\sigma}_{\beta\mu} \quad avec \quad \Gamma^{\nu}_{\mu\nu} = \frac{1}{2} g^{\sigma\nu} \frac{\partial g_{\sigma\nu}}{\partial x^{\mu}}.$$

Cette formule est à apprécier ici comme un tableau... » (p. 100). Comment un lecteur découvrant la relativité générale peut-il réagir face à une telle déclaration, qui sonne comme un aveu d'échec ? Au mieux, il passera à la ligne suivante, espérant trouver une description plus littéraire des notions présentées. Au pire, il sera irrité par cette exhibition mathématique qui accentue son sentiment d'ignorance — l'auteur, *lui*, *sait* ce que signifie cette formule.

Le texte se termine par des réflexions de S. Collion sur la nécessité de développer la culture scientifique du grand public et quelques vitupérations sur l'inaction des gouvernements français dans ce domaine. Ce dernier chapitre, s'il n'est pas inintéressant, aurait été plus pertinent dans une carte blanche adressée à un quotidien national qu'en conclusion du présent ouvrage.

Au final, il semble que S. Collion ait perdu son pari : montrer les mathématiques est sans doute plus exact, mais conduit à un livre ardu, imprécis, ne pouvant appartenir à une collection qui se targue de « faire connaître à un large public les avancées les plus récentes de la science » (4e de couverture).

Fabien Buisseret
Haute école Louvain-en-Hainaut

Willem (Michel), *Les diagonales de l'infini*. – Bruxelles : Académie royale de Belgique, 2019. – 72 p. – (L'Académie en poche). – 1 vol. broché de 11 × 18 cm. – 7,00 €. – isbn 978-2-8031-0670-7.

Voici un petit livre — 65 pages —, justement dans une collection de l'Académie qui se veut de poche, mais qui en vaut de bien plus épais parce qu'il donne à réfléchir en douceur, aussi bien aux mathématiciens chevronnés qu'à tous ceux simplement curieux des choses de science. Avec l'avantage d'un titre mystérieux pour les non habitués : il se décline en trois « diagonales », avec peut-être une allusion à Lewis Caroll lorsque son Alice s'ennuyait : « *what is the use of a book without pictures or conversations ?* ». Il y a bien des figures, et même un tableau ; la conversation se fait avec l'auteur qui mène la danse : je laisse à chacun le plaisir de découvrir comment l'on démontre géométriquement l'irrationalité

de la racine carrée de 2 juste en insérant sur deux angles opposés deux carrés de mêmes aires dans un carré d'aire double. Soyons aussi sage qu'Alice en évoquant les trois noms associés à une diagonale, celui de Pythagore, le célèbre auteur du VIe siècle avant notre ère, celui de Georg Cantor (1845-1918), l'inventeur de la théorie des ensembles, et enfin celui de Kurt Gödel (1906-1978), le logicien qui a démontré en 1931 qu'il existait dans tout système axiomatique formalisé un peu riche des propositions vraies, mais indémontrables par les seules règles dudit système. La première diagonale est donc tout simplement celle d'un carré de côté de longueur unité, et elle sert pour l'irrationalité déjà dite. La deuxième diagonale est celle de Cantor, à partir d'un tableau de nombres où l'on aurait placé ligne après ligne les nombres réels entre 0 et 1 supposés numérotés et écrits en écriture décimale illimitée. Enfin, une dernière diagonale vient de Gödel, sur sa preuve, exhibée en quelques lignes. Bref, c'est cette très belle concision qui fait la grande valeur de ce livre de Michel Willem que je recommande sans la moindre réserve.

Je me permets juste de dire qu'il aurait été judicieux, quitte à alourdir, d'expliquer combien la belle preuve géométrique de l'irrationalité bluffe d'autant plus qu'elle est relativement récente, et en tout cas ignorée des Grecs anciens. Un rien d'histoire aurait fait l'affaire. Il me semble que la même question se pose pour la preuve de Cantor, qui était en premier une preuve géométrique à partir de ce qu'on a appelé les segments emboîtés, et non le procédé dit diagonal. Il est passionnant qu'Alan Turing ait, dans un célèbre article de 1936 sur sa machine, utilisé le procédé diagonal au profit des nombres dits calculables, ou sortis de sa « machine ». Plus exactement, Turing montre que le procédé diagonal ne peut pas être utilisé pour conclure que les nombres calculables ne peuvent pas former un ensemble dénombrable. Se pose donc la question de savoir pourquoi le simple ne vient pas toujours d'abord ? Avec bien sûr la difficulté de définir ce qu'on appelle simple, et de lui associer le beau. Mais au moins le lecteur est convaincu à cette lecture qui, je le répète, est bien douce, de l'existence pratique de cette simplicité.

Jean Dhombres
Centre national de la recherche scientifique &
École des hautes études en sciences sociales

Physique

Petrini (Michela) - Pradisi (Gianfranco) - Zaffaroni (Alberto), *A Guide to Mathematical Methods for Physicists : Advanced Topics and Applications*. – London : World Scientific, 2019. – 296 p. – (Advanced Textbooks in Physics). – 1 vol. broché de 15 x 23 cm. – 40,00 £ – isbn 978-1-78634-704-6.

Dans un premier volume, que j'ai analysé récemment dans cette revue (vol. 190, 2019, n°1-2, pp. 237-238), les trois auteurs avaient décrit les méthodes mathématiques de base dont ont besoin les physiciens pour maîtriser la mécanique quantique. Ce volume comportait, d'une part, l'analyse complexe, d'autre part, les espaces fonctionnels, en particulier l'espace de Hilbert de dimension infinie et les opérateurs qui y vivent. Dans ce deuxième volume, les auteurs poursuivent leur entreprise à un niveau plus avancé. Alors que le pre-

mier volume visait un public d'étudiants, physiciens ou ingénieurs, de niveau deuxième ou troisième bachelier, celui-ci s'adresse au niveau master.

L'ouvrage comporte trois parties : analyse complexe, équations différentielles et espace de Hilbert. Dans la première (chap. 1 à 3), qui se base sur la section du même nom du premier volume, on commence par étudier les transformations conformes des fonctions holomorphes. On passe ensuite à la transformation de Laplace, qui peut être vue comme une généralisation holomorphe de la transformation de Fourier, puis à une étude très fouillée des développements asymptotiques et de leur multitude d'incarnations : intégrales de Laplace et de Fourier, méthodes de la phase stationnaire et du point de selle.

La seconde partie (chap. 4 à 7) démarre avec le problème de Cauchy pour les équations différentielles ordinaires, suivi par les problèmes liés aux conditions aux frontières, problème de Dirichlet et équations de Sturm-Liouville. On retrouve ici les polynômes classiques (Hermite, Legendre, Laguerre) et les harmoniques sphériques. Vient ensuite une étude systématique des fonctions de Green, traitées correctement comme des distributions. Comme toujours, la théorie est illustrée par de nombreux exemples classiques d'équations différentielles linéaires : équations de Poisson, de Laplace, de Gauss, équation de la chaleur, équation des ondes, fonction de Green avancée ou retardée. Au chap. 7 enfin, on étudie la résolution d'équations différentielles par développement en série autour d'un point critique et on retrouve les cas classiques, Hermite, Legendre, Bessel, équation hypergéométrique (normale ou confluente).

La troisième partie, intitulée « Espaces de Hilbert », comporte deux chapitres (chap. 8 et 9). Le premier présente la théorie des opérateurs compacts et des équations de Fredholm. Quant au second, c'est un mini-cours de mécanique quantique : équation de Schrödinger, formalisme probabiliste, problèmes classiques (oscillateur harmonique, atome d'hydrogène, effet tunnel, ...), approximation WKB.

L'ouvrage se termine par deux appendices : d'abord un bref rappel des notions vues dans le premier volume, ensuite la résolution explicite de tous les exercices proposés.

On retrouve ici les qualités rencontrées dans le premier volume : clarté, pédagogie, rigueur mathématique. Comme le précédent, il est orienté davantage vers la compréhension et les applications, présentées tantôt dans le texte, tantôt dans les exercices, plutôt que sur le développement de la théorie elle-même. Ici aussi, je ne peux que me féliciter de trouver un ouvrage de cette qualité, et donc de le recommander sans réserve, y compris aux enseignants des méthodes mathématiques de la physique.

Jean-Pierre Antoine
Université catholique de Louvain

Gao (Shan), *The Meaning of the Wave Function : In Search of the Ontology of Quantum Mechanics*. – First paperback edition. – Cambridge : Cambridge University Press, 2018. – 190 p. – 1 vol. broché de 18 × 25.5 cm. – 31.78 $. – isbn 978-1-108-46423-9.

Shan Gao est un philosophe de la physique, professeur de philosophie, Research Center for Philosophy of Science and Technology, Shanxi University, et Visiting Profes-

sor, University of Chinese Academy of Sciences. Auteur prolifique de nombreux livres et articles tant spécialisés que destinés à un large public, sa recherche se situe principalement en philosophie et en histoire de la physique et porte en particulier sur les fondements et l'ontologie de la mécanique quantique.

Dans le présent ouvrage, il aborde la question, ô combien délicate et controversée, de la « signification » de la fonction d'onde, question qui a fait, et fait encore, l'objet de vifs débats depuis les débuts de la mécanique quantique.

Pour répondre à cette question, il a développé une approche originale basée sur l'idée que la fonction d'onde décrit le mouvement discontinu et aléatoire de particules « réelles » (*Random Discontinuous Motion (RDM) of Particles*).

Ce modèle est développé dans les chapitres 6 et 7 (« Ontology of Quantum Mechanics » (I) et (II)), mais au préalable, Gao brosse un vaste panorama, pédagogique et bien argumenté, des différentes manières dont la question de la nature de la fonction d'onde peut être posée et replace son approche RDM dans un contexte plus large.

Ainsi, dans le premier chapitre (« Quantum Mechanics and Experience »), un exposé standard du formalisme de la mécanique quantique est rappelé ainsi que le lien entre ce formalisme et l'expérience. Il est à noter que la notion de « mesure protectrice », introduite par Aharonov, Anandan et Vaidman et qui joue un rôle clef dans la suite de son exposé, y est déjà présentée.

Dans les chapitres 2 (« The Wave Function : Ontic versus Epistemic ») et 3 (« The nomological view »), Gao aborde de plain-pied la question de la nature de la fonction d'onde : représente-t-elle la réalité (Ψ-Ontic) ou plutôt notre connaissance de la réalité (Ψ-Epistemic), comment interpréter sa « multidimensionnalité », la réduction du paquet d'ondes et les théorèmes Ψ-Ontologiques ?

Au chapitre 4 (« Reality of the Wave Function »), l'auteur invoque un critère de « réalité » assez faible basé sur la notion de « mesure protectrice », mesure durant laquelle le système mesuré n'est pas perturbé, la fonction d'onde déterminant le résultat de la mesure. Ceci le conduit, après un bref chapitre 5 (« Origin of the Schrödinger Equation »), à affirmer que la fonction d'onde d'un système quantique représente l'état physique d'un système unique. Fort de ce résultat, il pose au début du chapitre 6 (« The Ontology of Quantum Mechanics (I) »), la question : comment en mécanique quantique la charge de l'électron est-elle distribuée ? À la lumière des résultats obtenus auparavant, il arrive à la conclusion que le principe de superposition de la mécanique quantique impose que la distribution de charge d'un système quantique tel que l'électron soit effective, qu'à chaque instant il n'y ait qu'une particule localisée portant la totalité de la charge du système et que, durant un intervalle de temps infinitésimal, le mouvement aléatoire de la particule soit à l'origine de la distribution effective de la charge (*Picture of Random Discontinuous Motion of Particles*).

Au chapitre 7 (« The Ontology of Quantum Mechanics (II) »), cette description d'une particule par mouvements aléatoires discontinus est généralisée aux systèmes composés de N-particules et Gao défend l'idée que la fonction d'onde d'un système quantique

à N-corps représente l'état de mouvement aléatoire des N particules dans l'espace physique à trois dimensions et, en particulier, que le module au carré de la fonction d'onde soit la probabilité que les particules apparaissent dans chaque groupe possible des positions dans l'espace.

Remarquons en passant qu'en bon historien des sciences, il consacre un paragraphe de ce chapitre à l'histoire des modèles basés sur le mouvement aléatoire et discontinu des particules, depuis Épicure jusqu'à la théorie d'Everett (revue par Bell) en passant par Bohr et Schrödinger.

Dans le chapitre 8 (« Implications for Solving the Measurement Problem »), Gao étudie comment son modèle RDM peut contribuer à éclairer le problème de la mesure, autre problème emblématique et controversé dans le domaine des fondements de la mécanique quantique. La réponse apportée est un modèle de réduction spontanée de la fonction d'onde, mais, alors que les autres modèles de réduction spontanée postulent l'ajout d'un terme aléatoire à l'équation de Schrödinger, dans le cas du modèle de Gao, c'est le caractère aléatoire des mouvements des particules qui est à l'origine de la réduction du paquet d'ondes. Il est à noter qu'un des avantages de son modèle est de préserver la conservation de l'énergie.

Le chapitre 9 (« Quantum Ontology and Relativity ») aborde brièvement un autre grand problème de la physique contemporaine, à savoir la compatibilité entre la mécanique quantique et la relativité. La confrontation avec la relativité pose problème, car elle provoque une forte « distorsion » de l'image RDM des particules, ce qui conduit Gao à faire appel à la solution bien connue qui consiste à introduire un référentiel privilégié.

Enfin, le livre se termine par un agréable épilogue où l'auteur retrace son cheminement philosophique en le situant dans une perspective plus large.

Pour conclure, s'il est clair que le modèle RDM des particules ne va pas clore les débats sur l'ontologie de la mécanique quantique, le livre de Shan Gao n'en demeure pas moins un très bel exemple de texte de philosophie de la physique, parfois assez déroutant et éloigné des préoccupations des physiciens « non-philosophes », mais qui a le très grand mérite de donner un compte rendu « pointilleux », voire « pointilliste », des arguments et contre-arguments que l'on peut trouver dans la littérature. À ce titre, cet ouvrage peut être recommandé à toute personne s'intéressant aux fondements de la mécanique quantique.

De plus, et ce n'est pas le moindre attrait de ce livre, la plupart des chapitres contiennent d'excellentes introductions pédagogiques et bibliographiques aux questionnements, sans cesse renaissants, de ce domaine clef de la philosophie de la physique. À cet autre titre, l'ouvrage peut aussi être recommandé comme une très bonne introduction au monde de la philosophie de la physique quantique.

André Nauts
Université catholique de Louvain

COHEN-TANNOUDJI (Claude) - DIU (Bernard) - LALOË (Franck), *Mécanique quantique*. – Nouvelle édition. – Paris : CNRS Éditions ; Paris : EDP Sciences, 2018-2019. – xxi, 930 p. ; xix, 776 p. ; xix, 797 p. – (Savoirs actuels - Physique). – 3 vol. reliés de 16,5 × 24,5 cm. – 64 € + 64 € + 64 €. – isbn 978-2-7598-2287-4 + isbn 978-2-7598-2286-7 + isbn 978-2-7598-2335-2.

Dans les années 1960, la « bible » en français pour la mécanique quantique (MQ) était l'ouvrage en 2 volumes de A. Messiah. En 1973, ce rôle fut repris par la première édition du traité de Cohen-Tannoudji, B. Diu et F. Laloë, en 2 volumes également. Et voici maintenant la nouvelle édition de ce dernier, passée à 3 volumes, pour un total impressionnant de 2400 pages !

Dans cette nouvelle version (très attendue, selon l'éditeur), les auteurs ont conservé la structure originelle. Chacun des 21 chapitres est suivi de plusieurs compléments, en nombre variable, qui illustrent les méthodes et les concepts qui viennent d'être introduits. Ces compléments, qui sont indépendants les uns des autres, présentent différentes applications et des prolongements intéressants. En outre, à chaque chapitre, ils sont précédés d'un guide de lecture. Les auteurs insistent beaucoup sur le fait que les compléments ne doivent en aucun cas être étudiés systématiquement.

Le tome I présente d'abord une introduction générale du sujet, suivie d'un chapitre détaillé sur les outils mathématiques nécessaires. Viennent ensuite la description des postulats de la MQ, puis les grandes applications classiques : spin ½ et systèmes à deux niveaux, oscillateur harmonique 1-D, moments cinétiques, atome d'hydrogène. Ce premier tome diffère peu de celui d'origine.

Le tome II poursuit selon la même ligne, à un niveau un peu plus élevé : théorie des collisions, spin, composition des moments cinétiques, calcul des perturbations indépendantes ou dépendantes du temps, particules identiques et statistique. Ici, plusieurs nouveaux compléments ont été ajoutés, consacrés aux perturbations aléatoires et à la relaxation.

Le tome III, entièrement nouveau, est essentiellement une introduction à la théorie quantique des champs. Les chapitres 15 à 17 donnent les bases : opérateurs de création et d'annihilation, opérateur de champ, y compris en présence de particules identiques. Les chapitres 18 à 20 sont consacrés à la physique atomique. Après un bref rappel d'électromagnétisme classique, on passe en revue sa quantification, puis les interactions photon-atome. Le dernier chapitre, plus inattendu, mais bienvenu dans un cours de base, introduit la notion d'intrication quantique (*entanglement*) et les inégalités de Bell.

Les tomes I et II diffèrent relativement peu de l'ouvrage original et constituent toujours un bel outil pour un cours de base de MQ, destiné aux étudiants de deuxième ou troisième bachelier. En particulier, l'articulation chapitre/compléments offre de nombreuses extensions intéressantes, sans alourdir exagérément le texte. Quant au nouveau tome III, destiné plutôt aux étudiants de master, il complète harmonieusement l'ouvrage en ouvrant la porte à de nombreuses applications, en particulier en physique atomique. Il pave ainsi la voie à des textes plus élaborés, par exemple, *Advances In Atomic Physics : An Overview*, par (le même) C. Cohen-Tannoudji et D. Guery-Odelin, World Scientific, 2011. Nul doute

que ce nouveau cours jouera dans l'avenir le même rôle central dans l'enseignement de la MQ en milieu francophone que son prédécesseur.

Jean-Pierre Antoine
Université catholique de Louvain

Sciences de la Terre

Lévêque (Christian), *La biodiversité : avec ou sans l'homme ? Réflexions d'un écologue sur la protection de la nature en France*. – Versailles : Éditions Quæ, 2017. – 127 p. – 1 vol. broché de 16 × 24 cm. – 20,00 €. – isbn 978-2-7592-2687-0.

Décapant comme toujours, cet ouvrage de Lévêque interpelle d'emblée le lecteur par son titre cataclysmique. Car, à l'évidence, les systèmes écologiques sont, du moins en métropole française, tous anthropisés depuis longtemps et nécessitent une approche systémique qui tienne compte de l'ensemble des changements tant positifs que négatifs qu'a connu et continue à connaître notre nature, qui n'a plus rien de « pristin ». D'ailleurs que signifie biodiversité, mot-valise, à ne pas confondre avec diversité biologique, dans lequel chacun projette sa propre vision de la nature, en en stigmatisant le plus souvent sa destruction et en annonçant la catastrophe imminente, la sixième extinction massive pourtant bien mal étayée du point de vue scientifique. En conséquence, le paradigme des systèmes à l'équilibre (climax, bon état écologique) confortablement apprécié des gestionnaires doit faire place au paradigme des systèmes écologiques dynamiques aux trajectoires spatiales comme temporelles qui ne sont pas toujours prévisibles.

Le décor est planté et en 10 chapitres, allant de « Évaluer la diversité biologique, véritable casse-tête » à « Peut-on piloter les trajectoires de la nature ? », en passant par « Qu'en est-il de l'érosion de la diversité biologique en métropole ? » jusqu'aux « Limites floues de la naturalité », ..., Lévêque nous démontre que l'histoire de la diversité biologique est naturellement sans cesse renouvelée, qu'elle est le produit du changement (5 extinctions massives, multiples glaciations, etc.), le résultat du hasard et de la conjoncture, de la nécessité et de l'adaptation et qu'elle continuera à se modifier avec ou sans l'homme.

La diversité biologique en France métropolitaine doit autant aux hommes qu'aux processus spontanés naturels (ex. : bocages, Camargue, lac de Der, forêt de Tronçais) : les hommes ont transformé les habitats et introduits certaines espèces, d'autres sont même arrivées spontanément, résultat d'une reconquête post-glaciations.

La conservation de la nature doit passer par la démonstration qu'elle est utile aux hommes alors que la restauration des systèmes écologiques vise à revenir à un état plus naturel, originel, ce qui va à l'encontre de leurs trajectoires évolutives. Pour être efficace, la protection de la nature devrait s'appuyer sur les ressources sociales, culturelles et politiques locales et tenter de piloter les paramètres physiques, biologiques et sociaux qui la détermine en vue de co-construire une nature à venir avec bénéfices réciproques.

Pour améliorer la protection de la nature, ce grand capharnaüm qui débouche actuellement sur une véritable gabegie, il faut accepter le changement et l'accompagner en pilotant,

dans la mesure du possible, les trajectoires de nos systèmes anthropisés, ce qui implique des suivis réguliers et des réajustements permanents.

Tout lecteur intéressé par la nature et sa protection, tout écologiste, tout gestionnaire et tout étudiant du domaine aura avantage à s'imprégner de cette approche cataclysmique de la biodiversité pour déboucher sur une meilleure prospective de la protection de la nature et de sa biodiversité.

Jean-Claude Micha
Université de Namur

Rey (Freddy), *Restaurer les milieux et prévenir les inondations grâce au génie végétal.* – Versailles : Éditions Quae, 2018. – 114 p. – (Matière à débattre & décider). – 1 vol. broché de 14,5 × 21 cm. – 25,00 €. – isbn 978-2-7592-2777-8.

Voici un petit ouvrage spécialisé et limité aux têtes de bassin versant, mais bien intéressant par sa perspective qui vise à valoriser le résultat de quinze années de recherche en vue de restaurer les rivières, dont la Durance, et limiter les effets négatifs des inondations. Il s'inscrit dans la Directive Cadre sur l'eau en Europe, recommandant de maintenir les cours d'eau dans un bon état écologique, ce qui implique une gestion intégrée de leurs bassins versants. De plus, en France, la nouvelle compétence des services de Gestion des milieux aquatiques et de prévention des inondations (Gemapi) implique de concilier restauration des milieux et prévention des inondations. Ce livre vient donc à point pour nous démontrer que la solution réside dans l'ingénierie écologique et plus particulièrement dans le génie végétal, ce qui conduit à de multiples bénéfices pour le bassin versant et ses multiples usages.

Le premier chapitre « Pourquoi et comment végétaliser les terrains érodés » procède d'une approche systémique inventoriant toutes les problématiques liées à l'érosion des versants et à la sédimentation fine dans les rivières. Ainsi, le génie végétal, via l'installation de cordons en bois avec ou sans garnissage de boutures d'espèces adaptées dans les ravines, pourrait résoudre le problème. Mais faut-il encore expérimenter dans divers types de situation et en vérifier les multiples bénéfices.

Le second chapitre « Recherches sur les interactions entre végétation, érosion et sédimentation fine » permet de cerner les seuils d'efficacité de la couverture végétale, de vérifier la dynamique de la végétation dans la restauration écologique, la résistance aux crues ainsi que le contrôle de l'érosion.

Le dernier chapitre « De la recherche à l'ingénierie et à la décision » conduit à des solutions pratiques pour des bassins versants torrentiels de 0,1 à 3 ha, basées sur des règles d'ingénierie appliquées dans un modèle « Simulfascine », outil interactif permettant de déterminer les solutions les plus efficaces et les plus rentables économiquement. Bien que les approches développées dans ce contexte soient limitées aux petits sous-bassins versants marneux de la Durance, elles sont certes applicables à d'autres régions et d'autres pays.

En conclusion, recherches et résultats sont bien rédigés, bien vulgarisés, très bien illustrés avec graphiques et photos très pertinents, ce qui intéressera, sans nul doute, décideurs,

gestionnaires et aménagistes de territoires, parties prenantes des syndicats et contrats de rivières ainsi que tout formateur et étudiant en environnement et aménagement du territoire.

Jean-Claude Micha
Université de Namur

Sciences paramédicales

Ogden (Jane), *Psychologie de la santé* / avec la collaboration de Cécile Dantzer, Estelle Fall, Marie Izaute, Emmanuelle Le Barbenchon, Carine Meslot, Lisa Moussaoui, Laurent Muller, Sonia Pellissier, Caroline Poulet et Jean-François Verlhiac ; traduction d'Olivier Desrichard, Anaëlle Blum et Aurélie Gauchet. – 3e édition. – Louvain-la-Neuve : DeBoeck Supérieur, 2018. – 606 p. – 1 vol. broché de 27,5 × 21 cm. – 45,00 €. – isbn 978-2-8073-1939-4.

Il s'agit d'un cours de psychologie de la santé destiné à des étudiants de l'enseignement supérieur. L'introduction le justifie de la manière suivante. Le XIXe siècle a identifié une place pour l'homme dans la nature en suggérant que nous étions une partie de cette nature, que nous nous développions à partir d'elle, que nous étions des êtres biologiques. La médecine moderne s'appuie sur cette conception. Au XXe siècle, un rôle plus important a été donné à la psychologie de la santé. S'appuyant d'abord sur un modèle biomédical, elle a dû relever le défi de la médecine psychosomatique et de la médecine comportementale qui mettent en cause la séparation du corps et de l'esprit.

Ce livre considère les facteurs psychologiques intervenant dans les causes, la progression et les conséquences de l'état de santé d'un individu.

La psychologie de la santé utilise dans sa démarche une variété de méthodes. Celles-ci peuvent être quantitatives (enquêtes, essais contrôlés, expériences, étude de cas témoins) ou qualitatives (entretiens, *focus group*, analyse du discours…). L'outil statistique est fréquemment utilisé. Il ne s'agit pas d'une approche scientifique « dure » et le lecteur habitué à une approche purement moléculaire du fonctionnement de l'organisme humain pourra trouver des longueurs et répétitions au fil des chapitres.

Quatre grandes parties sont proposées au lecteur. La première, dénommée « l'environnement de la psychologie de la santé », inclut les origines de cette démarche « psychologie de la santé » et les inégalités de santé en fonction du lieu géographique, du niveau économique, du genre des personnes. La deuxième concerne les croyances, les connaissances sur la santé, les comportements qui influencent la santé (dépendances, alimentation, exercice physique). Elle se termine par un essai de définition de ce que représente « être en bonne santé » ou « être malade ». La troisième partie, qui me parait plus structurée que les autres, aborde les différents aspects du « devenir malade » avec l'importance pour le patient d'avoir un modèle cohérent de son problème. La quatrième partie, intitulée « être malade », examine d'abord la question de la douleur puis présente, par différentes approches, des pathologies précises (VIH, cancer, obésité, maladies coronariennes) ainsi que

leur occurrence chez la femme et l'homme. Le tout dernier chapitre pose la question de la qualité de vie avec ses dimensions psychologique, sociale, occupationnelle et physique. On y trouve une analyse fouillée de la manière de la mesurer.

Il s'agit d'un syllabus de qualité. Le fait que sa traduction française soit largement utilisée en est la preuve. Les nombreuses approches descriptives de symptômes et comportements donnent de temps à autre l'impression de reprise de mêmes développements d'idées dans un contexte différent. S'il y a beaucoup (trop) de subdivisions dans la structure des chapitres, ils se terminent par un résumé clair et concis accompagné de questions qui ouvrent à la réflexion et à la discussion.

Pierre Devos
Université de Namur

Guide du diagnostic en ergothérapie / Bénédicte Dubois, Sarah Thiébaut Samson, Éric Trouvé, Marine Tosser, Géraldine Poriel, Leïla Tortora, Karine Riguet, Jérémy Guesné. – Louvain-la-Neuve : De Boeck Supérieur, 2017. – xiii, 81 p. – (Ergothérapie). – 1 vol. broché de 16 × 24 cm. – 19,90 €. – isbn 978-2-35327-439-0.

Ce petit livre (81 pages) nous présente un élément encore peu abordé et pourtant essentiel dans la pratique de l'ergothérapie : le diagnostic ergothérapique. À travers un travail collectif et rigoureux, les auteurs nous proposent de modéliser cette étape du processus mis en place lors de nos interventions en nous permettant de comprendre et de maîtriser l'ensemble des concepts qui sous-tendent le diagnostic. De nombreux exemples concrets émaillent les différents chapitres, afin d'appuyer et d'illustrer la théorie présentée.

Dans le premier chapitre, une recension des écrits a été effectuée afin de présenter des ressources bibliographiques (anglophones et francophones) traitant de ce qu'est le diagnostic — que cela soit au point de vue étymologique, appliqué au domaine de la santé en général ou à celui de l'ergothérapie en particulier — pour aboutir à une proposition d'éléments en vue d'une définition consensuelle du diagnostic ergothérapique.

Le concept d'occupation, élément essentiel à la compréhension de notre pratique, est développé dans le deuxième chapitre, en pointant l'intérêt d'utiliser l'occupation comme « centre de gravité » du diagnostic ergothérapique.

Le troisième chapitre s'intéresse à l'objet du diagnostic : l'état occupationnel d'une personne. Comme dans le premier chapitre, les auteurs nous présentent des définitions issues des écrits recensés. Les domaines d'occupation présents dans différents modèles de pratique ergothérapique sont ensuite détaillés afin de préciser la définition.

La place du diagnostic dans le raisonnement clinique de l'ergothérapeute est précisée dans le quatrième chapitre. Les différentes étapes du diagnostic (recueil et interprétation d'indices, validation des hypothèses) sont exposées à l'aide de cas cliniques.

Le diagnostic s'inscrit dans une démarche de rédaction indispensable pour « mettre en valeur les compétences professionnelles spécifiques de l'ergothérapeute tout en traduisant la pertinence de son accompagnement » (p. 41). C'est cette responsabilité, cet enga-

gement professionnel qui nous est rappelé dans le cinquième chapitre, notamment par les obligations légales.

Le sixième chapitre explique, concrètement, comment s'y prendre pour rédiger le diagnostic : quels éléments doivent y figurer ? Comment les structurer ?

Dans leur conclusion, les auteurs insistent sur l'importance de nourrir leur réflexion sur l'élaboration du diagnostic en tenant compte des retours des praticiens et des étudiants stagiaires. De nombreux exemples concrets sont, une nouvelle fois, présentés afin d'illustrer de manière très claire la rédaction du diagnostic.

Sans aucun doute, cet ouvrage permettra à chaque ergothérapeute de mieux comprendre sa pratique et d'améliorer ses compétences grâce à une démarche scientifique basée sur des données probantes.

Florence Terrier
Haute école Louvain-en-Hainaut

Divers

Tomasello (Michael), *A Natural History of Human Morality*. – Cambridge (Mass.) ; London : Harvard University Press, 2016. – 194 p. – 1 vol. relié de 24,5 × 16 cm. – 28,24 €. – isbn 978-0-674-08864-1.[1]

Michael Tomasello est un psychologue cognitif et développemental américain. Il est « considéré comme le "spécialiste" mondial de l'étude comparative des capacités cognitives »[2] des grands singes (qu'il a testé et étudié au *Wolfgang Köhler Primate Research Center* de Leipzig) et des enfants humains. Il fut le co-directeur de l'Institut Max Planck d'anthropologie évolutionnaire à Leipzig[3] de 1998 à 2018. Il est, depuis 2016, professeur de psychologie à *Duke University* (USA).

Ce dernier livre de Tomasello sur l'origine de la moralité humaine est le pendant exact de celui qu'il a publié en 2014 sous le titre : *A Natural History of Human Thinking*. Il est très bien structuré et est agrémenté d'excellents schémas et de synthèses : il présente de grandes qualités pédagogiques. Cependant, il n'est pas d'un abord facile pour le non spécialiste et il est très dense.

L'auteur y fait trois hypothèses. La première, fondamentale, en est que les grands singes sont interdépendants et coopèrent par sympathie, c'est-à-dire par « pure coopération, ba-

1. Une synthèse détaillée de ce livre, assortie de commentaires, peut être trouvée à l'adresse : https://researchportal.unamur.be/en/publications/synth%C3%A8se-comment%C3%A9e-dun-livre-phare-sur-lorigine-de-la-moralit%C3%A9
2. Plateau S. (2006 ; 2009 en ligne), M. Tomasello. Aux origines de la cognition humaine, *L'orientation scolaire et professionnelle*, 35/4 ; https://osp.revues.org/1232.
3. Fondé en 1997 pour répondre à la question : « Qu'est-ce qui rend l'homme unique ? », ce centre occupe actuellement plus de 400 chercheurs.

sée sur le souci du bien-être des autres » et dépourvue du sens de l'obligation (p. 1). La source évolutive de la sympathie, explique l'auteur, sont les soins parentaux à leur progéniture. Elle se retrouve chez tous les mammifères (cf. régulation de l'ocytocine) mais, chez certains d'entre eux seulement, s'étend aussi à des amis.

La deuxième hypothèse est que l'*Homo sapiens* est le seul primate à être « moral ». La moralité des humains est une forme de coopération, qui se décline en terme non seulement de sympathie mais aussi d'équité. Cette dernière est définie par Tomasello comme « une sorte de "coopérativisation" de la compétition dans laquelle les individus recherchent des solutions équilibrées aux problèmes nombreux et conflictuels de multiples participants » (p. 2) ; elle est motivée par ce qui est juste et elle se traduit par des actes posés après un jugement (impliquant des valeurs) et pourvus de sens de l'obligation.

Et la troisième hypothèse est que la « moralité humaine comprend un ensemble clé de mécanismes proches et propres à l'espèce — processus psychologique de cognition (intentionnalité), d'interaction sociale et d'autorégulation — qui rend les individus humains capables de survivre et de prospérer dans leurs dispositions sociales spécialement coopératives » (pp. 2-3).

Le cheminement suivi par le scientifique pour son analyse est le suivant : sur base expérimentale, commencer par mettre en évidence ce qui distingue la coopération au sein des humains de celle existant au sein des groupes de primates qui leur sont proches ; ensuite « construire un scénario évolutif plausible pour expliquer comment un tel degré de coopération uniquement humain a débouché sur la moralité humaine » (p. 3). Ce scénario évolutif est celui d'un accroissement de l'interdépendance en deux étapes. La première étape date, selon l'auteur, de - 400.000 ans environ et concerne ceux qu'il désigne par le vocable « premiers hommes » ; elle est celle d'un accroissement de la collaboration imposé par des challenges écologiques : changements climatiques impliquant, pour les humains, le recours obligatoire à la chasse pour pouvoir survivre. La seconde qui, toujours selon Tomasello, commence avec l'émergence de l'*Homo sapiens* aboutit à la culture : elle résulte d'un accroissement de la population et de la complexité de la division du travail.

Le résultat actuel de cette évolution est, selon le psychologue, qu'il existe, chez l'être humain, au moins trois couches de moralités superposées : la première est la tendance à la coopération basée sur la sympathie et existant chez tous les grands singes et qui s'adresse à la famille et aux amis ; la deuxième est une collaboration commune où apparaissent des responsabilités spécifiques, envers des individus spécifiques et dans des circonstances spécifiques. Elle est qualifiée ici de moralité « à la seconde personne » ; et la troisième est désignée ici par les termes de « moralité culturelle et objective », dictée par un groupe.

« Les êtres humains sont naturellement enclins à avoir de la sympathie et à être équitables envers les autres même s'ils sont parfois égoïstes » souligne l'auteur (p. 162). Et il termine son ouvrage avec la phrase suivante : « la moralité semble être, d'une certaine façon, bonne pour notre espèce, notre culture et nous-mêmes — du moins jusqu'à présent » (p. 163).

Quel jugement porter sur cet ouvrage ? Il faut tout d'abord noter qu'il vient en quelque sorte prolonger certaines thèses sur l'origine de la moralité formulées auparavant par l'étho-

logue Frans de Waal[1] qui se focalisent quant à lui sur l'étude du comportement des singes. Mais, solidement étayé par de nombreuses observations empiriques également sur les humains et suggérant un scénario évolutif, l'ouvrage de Tomasello apporte certainement un éclairage nouveau et original à la question de l'origine de la moralité proprement humaine. Il apparaît donc comme fondamental et incontournable. Il est d'ailleurs très fréquemment cité dans la littérature.

D'autre part, il s'attaque à un sujet qui se révèle être comme un nœud important d'un réseau d'éléments divers interconnectés : dès lors, il est digne, me semble-t-il, de susciter l'intérêt et la réflexion de spécialistes de nombreuses disciplines, notamment l'anthropologie, la sociologie, la psychologie, l'éthologie, l'économie, la philosophie, le droit et l'histoire des religions. Et par là même, il incite à des études interdisciplinaires.

Et les résultats largement concordant des études de de Waal et de Tomasello, basées sur des observations et des expériences récentes, sont de nature à modifier profondément l'image que beaucoup de scientifiques, influencés par les idées passées, dressent encore aujourd'hui du « propre de l'espèce *Homo sapiens* » et de la rationalité humaine.

Marie d'Udekem-Gevers
Université de Namur

1. Voir notamment le livre de F. De Waal intitulé *Le bon singe : les bases naturelles de la morale* (Éditions Bayard, 1997).

Ouvrages reçus à la rédaction

Hypotheses and Perspectives in the History and Philosophy of Science : Homage to Alexandre Koyré 1892-1964 / editors : Raffaele Pisano, Joseph Agassi, Daria Drozdova. – Cham : Springer, 2018. – xxviii, 482 p. – 1 vol. relié de 16 × 24 cm. – 137,79 €. – isbn 978-3-319-61710-7.

Manuel d'enseignement de psychomotricité. – Tome 4 : *Sémiologie et nosographies psychomotrices* / dirigé par Jean-Michel Albaret, Philippe Scialom et Françoise Giromini. – Louvain-la-Neuve : De Boeck Supérieur, 2018. – 704 p. – (Psychomotricité). – 1 vol. broché de 16 × 24 cm. – 39,90 €. – isbn 978-2-3532-7369-0.

Manuel d'enseignement de psychomotricité. – Tome 5 : *Examen psychomoteur et tests* / dirigé par Jean-Michel Albaret, Philipe Scialom et Françoise Giromini. – Louvain-la-Neuve : De Boeck Supérieur, 2018. – 344 p. – (Psychomotricité). – 1 vol. broché de 16 × 24 cm. – 35,00 €. – isbn 978-2-8073-2131-1.

Médecins et philosophes : une histoire / sous la direction de Claire Crignon et David Lefebvre. – Paris : CNRS Éditions, 2019. – 512 p. – 1 vol. broché de 15 × 23 cm. – 26,00 €. – isbn 978-2-271-09287-8.

Pascal's Wager / edited by Paul Bartha and Lawrence Pasternack. – Cambridge : Cambridge University Press, 2018. – 335 p. – (Classic Philosophical Arguments). – 1 vol. broché de 17,5 × 24,5 cm. – £ 24,99. – isbn 978-1-316-63265-9.

Sing Aloud Harmonious Spheres : Renaissance Conceptions of Cosmic Harmony / edited by Jacomien Prins and Maude Vanhaelen. – New York ; London : Routledge, 2018. – 294 p. – (Warwick Studies in the Humanities). – 1 vol. broché de 15,5 × 23,5 cm. – £ 110,00. – isbn 978-1-138-06346-4.

The Oxford Handbook of the History of Modern Cosmology / edited by Helge Kragh and Malcolm S. Longair. – Oxford : Oxford University Press, 2019. – 1 vol. électronique. – 96,78 €. – isbn 978-0-19-254997-6.

Ammerich (Marc), *Exercices de radioprotection*. – Tome 1 : *Personnes compétentes en radioprotection*. – Les Ulis : EDP Sciences, 2019. – 108 p. – 1 vol. broché de 16 × 24 cm. – 15,00 €. – isbn 978-2-7598-2324-6.

Ammerich (Marc), *Exercices de radioprotection*. – Tome 2 : *Niveau initial en radioprotection*. – Les Ulis : EDP Sciences, 2019. – 144 p. – 1 vol. broché de 16 × 24 cm. – 18,00 €. – isbn 978-2-7598-2325-3.

Ammerich (Marc), *Exercices de radioprotection*. – Tome 3 : *Niveau supérieur en radioprotection*. – Les Ulis : EDP Sciences, 2019. – 271 p. – 1 vol. broché de 16 × 24 cm. – 39,00 €. – isbn 978-2-7598-2326-0.

Balan (Bernard), *Montagnes et continents : la tectonique* / préface de Laurent Jolivet. – Paris : Vrin, 2018. – 344 p. – (L'histoire des sciences : textes et études). – 1 vol. broché de 13,5 × 21,5 cm. – 30,00 €. – isbn 978-2-7116-2813-1.

Balibar (Sébastien), *Savant cherche refuge : comment les grands noms de la science ont survécu à la Seconde Guerre mondiale*. – Paris : Odile Jacob, 2019. – 252 p. – 1 vol. broché de 14,5 × 22 cm. – 23,90 €. – isbn 978-2-7381-4657-1.

Berland (Patrick), *Pourquoi croire quand on peut savoir : astrologie, homéopathie, anti-vaccins, Rudolf Steiner, pseudo médecines... Ma vie chez les ésotériques*. – [s. l.] : Librinova, 2019. – 667 + 579 p. – 2 vol. brochés de 14 × 21,5 cm. – 23,90 €. – isbn 979-10-262-2846-2 (vol. 1) et 979-10-262-2848-6 (vol. 2).

Broadbent (Alex), *Philosophy of Medicine*. – New York : Oxford University Press, 2019. – 276 p. – 1 vol. broché de 14,5 × 22 cm. – £ 64,00. – isbn 978-0-19-061213-9.

Burke (Bernard F.) - Graham-Smith (Francis) - Wilkinson (Peter N.), *An Introduction to Radio Astronomy*. – Fourth Edition. – Cambridge ; New York ; Port Melbourne ; New Delhi ; Singapore : Cambridge University Press, 2019. – 524 p. – 1 vol. relié de 18 × 25,5 cm. – £ 59,99. – isbn 978-1-107-18941-6.

Chinnici (Ileana), *Decoding the Stars : a Biography of Angelo Secchi, Jesuit and Scientific*. – Leiden : Brill, 2019. – (Jesuit Studies, 16). – 1 vol. électronique. – 140,00 €. – isbn 978-90-04-38733-1.

Clervoy (Jean-François) - Lehot (Frank), *Histoire de la conquête spatiale*. – Louvain-la-Neuve : De Boeck Supérieur, 2019. – 256 p. – 1 vol. broché de 19,5 × 24 cm. – 25,00 €. – isbn 978-2-8073-2075-8.

Collion (Stéphane), *Voyage dans les mathématiques de l'espace-temps : trous noirs, big-bang, singularités*. – Les Ulis : EDP sciences, 2019. – 208 p. – (Une introduction à). – 1 vol. broché de 17 × 24 cm. – 29,00 €. – isbn 978-2-7598-2279-9.

Delahaye (Jean-Paul), *Le fascinant nombre pi*. – Paris : Belin, 2018. – 384 p. – 1 vol. broché de 15 × 22 cm. – 22,00 €. – isbn 978-2-410-01445-7.

Deruelle (Nathalie) - Lasota (Jean-Pierre), *Les ondes gravitationnelles*. – Paris : Odile Jacob, 2018. – 334 p. – 1 vol. broché de 14,5 × 21,5 cm. – 25.00 €. – isbn 978-2-7381-4334-1.

Demaret (Inès), *La damnation des maladies orphelines : entre une France sensibilisée et une Belgique paralysée, état des lieux et pistes de solutions* / préfacé par Matthias Lambert. – Paris : La Boîte à Pandore, 2019. – 244 p. – 1 vol. broché de 14 × 21,5 cm. – 18,90 €. – isbn 978-2-87557-399-5.

Fink (Heather Hedrick) - Mikesky (Alan E.), *Nutrition du sport* / traduit de l'américain par Tristan Kottelanne. – Louvain-la-Neuve : De Boeck Supérieur, 2018. – 518 p. – (Sciences et pratiques du sport). – 1 vol. broché de 21 × 27 cm. – 59,00 €. – isbn 978-2-8073-1530-3.

Gavin (Jérôme) - Schärlig (Alain), *Sept pères du calcul écrit : des chiffres romains aux chiffres arabes 799 - 1202 - 1619*. – Lausanne : Presses polytechniques et universitaires romandes, 2018. – 148 p. – 1 vol. broché de 16 × 24 cm. – 23,60 €. – isbn 978-2-88915-278-0.

Gentaz (Édouard), *La main, le cerveau et le toucher : approches multisensorielles et nouvelles technologies*. – 2e édition revue et actualisée. – Malakoff : Dunod, 2018. – 192 p. – (Univers Psy). – 1 vol. broché de 17 × 24 cm. – 24,00 €. – isbn 978-2-10-078140-9.

Ginoux (Jean-Marc), *Pour en finir avec le mythe d'Albert Einstein*. – Paris : Hermann, 2019. – 302 p. – 1 vol. broché de 15 × 21 cm. – 23,00 €. – isbn 979-10-370-0101-6.

Hossenfelder (Sabine), *Lost in Maths : comment la beauté égare la physique* / traduit de l'anglais (États-Unis) par Raymond Clarinard. – Paris : Les Belles Lettres, 2019. – 344 p. – 1 vol. broché de 14 × 21 cm. – 19,50 €. – isbn 978-2-251-44931-9.

Jaffe (Robert L.) - Taylor (Washington), *The Physics of Energy*. – Cambridge : Cambridge University Press, 2018. – 874 p. – 1 vol. broché de 22,5 × 28 cm. – £ 59,99. – isbn 978-1-107-01665-1.

Kaku (Michio), *L'avenir de l'humanité : terraformage de Mars, voyages interstellaires, notre destinée en dehors de la Terre* / traduction de Paul Depovere. – Louvain-la-Neuve : De Boeck Supérieur, 2019. – 384 p. – 1 vol. broché de 16 × 24 cm. – 20,00 €. – isbn 978-2-8073-2232-5.

Kirkup (Les), *Experimental Methods for Science and Engineering Students : an Introduction to the Analysis and Presentation of Data*. – Second edition. – Cambridge ; New York ; Port Melbourne ; New Delhi ; Singapore : Cambridge University Press, 2019. – 224 p. – 19,5 × 25,5 cm. – $ 52,87 CAD. – isbn 978-1-108-41846-1.

Leibniz (Gottfried Wilhelm), *Mathesis universalis : écrits sur la mathématique universelle* / textes introduits, traduits et annotés sous la direction de David Rabouin. – Paris : Vrin, 2018. – 256 p. – (Mathesis). – 1 vol. broché de 13,5 × 21,5 cm. – 23,00 €. – isbn 978-2-7116-2816-2.

Obolevitch (Teresa), *Faith & Science in Russian Religious Thought*. – Oxford : Oxford University Press, 2019. – 220 p. – 1 vol. broché de 16 × 24 cm. – £ 65,00. – isbn 978-0-19-883817-3.

Ortega y Gasset (José), *Autour de Galilée : du christianisme au rationalisme, du monde moderne à la post-modernité* / traduit par Luc Roche. – Strasbourg : Éditions Perspectives

Libres - ADARL, 2018. – 226 p. – 1 vol. broché de 15 × 21 cm. – 25,00 €. – isbn 979-10-90742-43-7.

Pierron (Jean-Philippe), *Prendre soin de la nature et des humains : médecine, travail, écologie*. – Paris : Les Belles Lettres, 2019. – 528 p. – (Médecine & sciences humaines). – 1 vol. broché de 13,5 × 21 cm. – 29,00 €. – isbn 978-2-251-44922-7.

Pouydebat (Emmanuelle), *Quand les animaux et les végétaux nous inspirent* / préface du professeur Gilles Boeuf. – Paris : Odile Jacob, 2019. – 208 p. – (Avant l'histoire). – 1 vol. broché de 14,5 × 22 cm. – 22,90 €. – isbn 978-2-7381-4924-4.

Tunstall (Richard) - Shah (Nehal), *Anatomie de surface* / traduit de l'anglais par Pierre Nevers ; révision scientifique de Jean-Pol Beauthier. – Louvain-la-Neuve : De Boeck Supérieur, 2018. – 306 p. – 1 vol. broché de 12 × 19 cm. – 29,00 €. – isbn 978-2-8041-8814-6.

Turner (Jonathan H.) - Maryanski (Alexandra) - Klostergaard Petersen (Anders) - Geertz (Armin W.), *The Emergence and Evolution of Religion : by Means of Natural Selection*. – New York ; London : Routledge, 2017. – 304 p. – (Evolutionary Analysis in the Social Sciences). – 1 vol. broché de 15 × 23 cm. – £ 27,99. – isbn 978-1-138-08092-8.

Udías (Agustin), *Jesuits and the Natural Sciences in Modern Times, 1814-2014*. – Leiden ; Boston : Brill, 2019. – 104 p. – (Brill Research Perspectives). – 1 vol. électronique. – 70,00 €. – isbn 978-90-04-39490-2.

Viglietti (Lukas), *Apollo confidentiel : mémoires d'hommes sur la Lune* / préface de Charlie Duke. – Louvain-la-Neuve : De Boeck Supérieur, 2019. – 288 p. – 1 vol. broché de 15 × 22 cm. – 19,00 €. – isbn 978-2-8073-2301-8.

Villani (Cédric), *Les mathématiques sont la poésie des sciences, suivi de L'invention mathématique par Henri Poincaré* / illustrations d'Étienne Lécroart. – [Paris] : Flammarion, 2018. – 122 p. – (Champs sciences). – 1 vol. broché de 11 × 18 cm. – 5,00 €. – isbn 978-2-0814-2241-4.

Waquet (Françoise), *Une histoire émotionnelle du savoir : XVIIe-XXIe siècle*. – Paris : CNRS Éditions, 2019. – 352 p. – 1 vol. broché de 15 × 23 cm. – 25,00 €. – isbn 978-2-271-09337-0.

Willem (Michel), *Les diagonales de l'infini*. – Bruxelles : Académie royale de Belgique, 2019. – 72 p. – (L'Académie en poche). – 1 vol. broché de 11 × 18 cm. – 7,00 €. – isbn 978-2-8031-0670-7.

Wray (K. Brad), *Resisting Scientific Realism*. – Cambridge : Cambridge University Press, 2018. – 224 p. – 1 vol. broché de 15,5 × 23,5 cm. – £ 49,26. – isbn 978-1-108-41521-7.

CONDITIONS D'ABONNEMENT (2019, VOL. 190)

L'abonnement est annuel, à partir de janvier, et court jusqu'à ordre contraire.

En Belgique et au Luxembourg	45,00 €
abonnement de soutien	150,00 €
abonnement étudiant	22,50 €
Pour la France (TVA comprise)	49,82 €
Pour les autres pays (toutes taxes incluses)	60,67 €
Prix au numéro trimestriel (TVA comprise)	15,00 à 25,00 €
Pour paiement par chèque	ajouter 25,00 €

SECRÉTARIAT DE LA SOCIÉTÉ SCIENTIFIQUE DE BRUXELLES :

61, rue de Bruxelles – 5000 Namur – Belgique
ING. (Avenue Marnix 24 B – 1000 Bruxelles)
IBAN : BE35 3500 0659 7537
BIC : BBRUBEBB
TVA : BE 0407 654 574

Revue publiée avec l'aide financière

- du Fonds National de la Recherche Scientifique
- de l'Université de Namur (ESPHIN)
- du Fonds Wernaers


HELHa
Haute École Louvain en Hainaut
BELGE
SCIENCES
PLURIDISCIPLINAIRE
PHILOSOPHIE
HISTOIRE
FRANCOPHONE
HAUTE VULGARISATION
ACCESSIBLE
INFORMATIONS VALIDÉES
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ DE NAMUR
Revue des
QUESTIONS SCIENTIFIQUES
ISSN 0035-2160
Actualité, histoire et philosophie des sciences
Tome 190, N°3-4, 2019
www.rqs.be
CE NUMÉRO : 25 €
shutterstock.com